

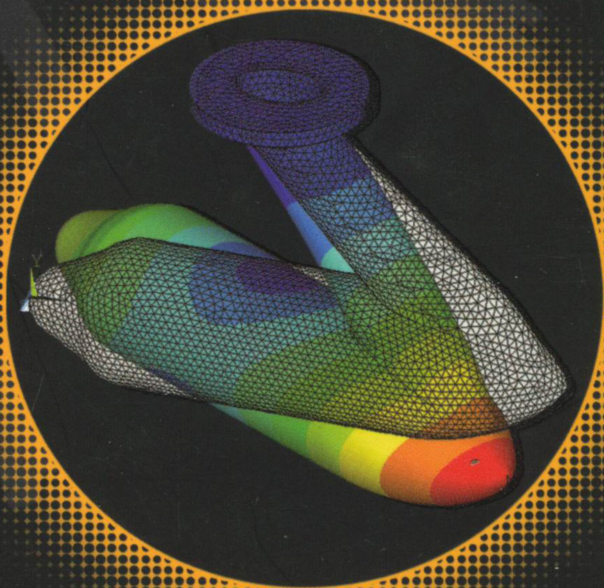
CAD/CAM/CAE工程应用丛书　ANSYS系列

ANSYS 13.0
流场分析
技术及应用实例

◎ 李明高　李明　主编　李国清　韩璐　等编著

本书核心内容包含

- 计算流体力学基础
- ANSYS CFD 13.0基础知识
- 建筑物内流场舒适度计算
- 高速列车空气动力学性能计算
- 无预混燃烧
- CFX软件与流体力学性能分析
- 其他后处理软件

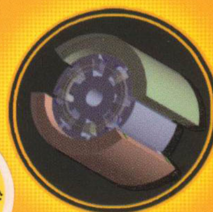




附赠全书范例素材 DVD 光盘









机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

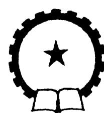
LANZAROTE Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 · ANSYS 系列

ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例

李明高　李 明　主　编

李国清　韩 璐　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书详细介绍了 ANSYS 13.0 软件应用于流场分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。

本书共 7 章，第 1 章主要介绍计算流体力学基础，第 2 章主要介绍 ANSYS CFD 13.0 基础知识（包括 FLUENT、CFX、ICEM-CFD 等软件），第 3 章主要介绍建筑物内流场舒适度计算，第 4 章主要介绍高速列车空气动力学性能计算，第 5 章主要介绍无预混燃烧，第 6 章主要介绍 CFX 软件与流体力学性能分析，第 7 章主要介绍其他后处理软件。

本书可作为教学、科研和设计部门从事传热、流体流动等学科的教师、工程技术人员与科研人员参考用书，也可作为软件入门教程或参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例 / 李明高，李明主编；李国清等编著．—北京：机械工业出版社，2012.7

（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 • ANSYS 系列）

ISBN 978-7-111-39084-8

Ⅰ．①A…　Ⅱ．①李…　②李…　③李…　Ⅲ．①流场测试－应用程序　Ⅳ．①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 151659 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦
责任编辑：张淑谦　常建丽
责任印制：乔　宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012 年 7 月第 1 版 • 第 1 次印刷

184mm×260mm • 19.25 印张 • 474 千字

0001－3500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-39084-8

ISBN 978-7-89433-548-7（光盘）

定价：58.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社服务中心：（010）88361066
销售一部：（010）68326294
销售二部：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的《CAD/CAM/CAE 工程应用丛书》。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　　言

计算流体力学（CFD）是一种由计算机模拟流体流动、传热及相关传递现象的系统分析方法和工具。CFD 的长处是：适应性强、应用面广，目前已广泛涵盖了高速铁路行业、汽车和航空业的空气动力学领域（如升力、阻力和倾覆力矩等）以及内部流场分析、热管理等；电子和电器行业的电子设备换热分析（如冷板、换热器等的流动及传热计算）；建筑物的内外环境流场及换热分析（如风载荷和通风等）；流体机械的仿真分析（包括泵和风机等）；此外，在化学过程分析、燃烧计算、环境工程、气象分析等方面也有较多应用。

蕴含了一系列先进功能的大型商业软件——ANSYS 13.0，凭借其友好的软件界面、易用的功能模块和高可信度的仿真结果，可以帮助客户更快速、便捷和低成本地进行流体力学分析，为设计人员开发新产品带来了极大的方便。在 ANSYS 13.0 软件的帮助下，设计者不必费心钻研流体力学微分方程以及计算流体力学，通过软件丰富的网格划分、计算模型和求解方法等功能，可快速完成评估任务、缩短研发周期、提高设计质量。

鉴于 ANSYS 公司目前的发展方向是将旗下各流体力学求解软件归一化发展，本书将 ANSYS 13.0 版本中的 FLUENT、CFX 和 ICEM 等软件统称为 ANSYS CFD 13.0 软件。ANSYS 13.0 软件继续发展智能工程仿真技术，引领产品开发迈向新的阶段，在更高精度和保真度、更高生产力、更高计算能力三大领域体现出全新价值。通过压缩设计周期，优化产品多物理场性能，最大限度提高仿真模型精度和自动化仿真过程的效率，ANSYS CFD 令创新性产品的问市更快速、便捷。

本书全面介绍了 ANSYS 13.0 软件流场分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。全书共 7 章，第 1 章主要介绍计算流体力学基础，第 2 章主要介绍 ANSYS CFD 13.0 基础知识（包括 FLUENT、CFX、ICEM CFD 等软件），第 3 章主要介绍建筑物内流场舒适度计算，第 4 章主要介绍高速列车空气动力学性能，第 5 章主要介绍无预混燃烧，第 6 章主要介绍 CFX 软件与流体力学性能分析，第 7 章主要介绍其他后处理软件。

本书主要由李明高、李明、李国清和韩璐编写。此外，参与编写的还有孔繁冰、杨耀华、邵蓉、李娜、周德来、牛雪民、邵其方。同时感谢张继业教授、郭迪龙教授、谢永奇教授、李田、郑循浩、刘晨辉和肖占等在本书编写过程中给予的宝贵建议。由于编者水平有限，写作时间仓促，书中难免有不妥、疏漏之处，欢迎广大读者对本书提出批评和建议，以便做进一步修改和补充。

编　者

目　　录

出版说明
前言
第 1 章　计算流体力学基础……1
1.1　流体力学的基本概念……1
1.2　计算流体力学的基本概念……4
1.3　流体运动及换热的基本控制方程……8
1.4　湍流的数值模拟方法……9
1.5　标准k-ε模型方程……11
1.6　近壁面处理函数……12
1.7　CFD 求解计算的方法……15
1.8　网格……17
1.8.1　结构化网格……17
1.8.2　非结构化网格……18
1.8.3　混合网格……20
1.8.4　网格质量……20
第 2 章　ANSYS CFD 13.0 基础知识……22
2.1　ANSYS CFD 13.0 软件概述……22
2.1.1　ANSYS FLUENT/CFX 13.0 的新功能……22
2.1.2　FLUENT 软件……24
2.1.3　CFX 软件……26
2.2　ANSYS 13.0 软件的安装方法……26
2.3　FLUENT 的用户界面……48
2.3.1　启动 FLUENT……48
2.3.2　菜单项……51
2.3.3　项目树……53
2.3.4　鼠标功能……54
2.4　FLUENT 的求解技巧……54
2.4.1　FLUENT 的数值算法……54
2.4.2　FLUENT 的湍流模型……55
2.4.3　FLUENT 的物理模型……57
2.4.4　FLUENT 的边界条件……60
2.4.5　FLUENT 的求解器……68
2.4.6　瞬态 CFD 分析……71
2.4.7　其他应注意的项……73

2.5 CFX 的用户界面……76
2.6 CFX 的求解技巧……79
2.7 CFD-Post 与计算结果后处理……79
2.8 FLUENT/CFX 软件在 Workbench 环境中的应用……87
2.9 用户自定义函数……88
2.10 前处理软件……90
2.10.1 ICEM CFD 软件的基本功能介绍……90
2.10.2 GAMBIT 软件的基本功能介绍……92
第 3 章 建筑物内流场舒适度计算……94
3.1 实例简介……94
3.2 建筑物模型的前处理……95
3.3 室内空气流场计算……106
3.3.1 物理条件的设置……106
3.3.2 求解条件的设置……114
3.4 室内空气流场分析……117
3.4.1 室内流线图的绘制……117
3.4.2 室内温度分布……119
3.5 无内热源的室内空气流场计算……123
第 4 章 高速列车空气动力学性能计算……127
4.1 计算实例及空气动力学专业术语……127
4.2 明线运行气动性能计算……128
4.2.1 高速列车空气动力学计算模型的建立……128
4.2.2 计算模型的设置……143
4.2.3 求解条件的设置……149
4.2.4 加边界层后计算结果的对比……153
4.2.5 计算结果后处理……159
4.3 横风运行气动性能计算……163
4.3.1 计算模型的设置……163
4.3.2 计算结果后处理……166
4.4 高速列车明线交会性能研究……168
4.4.1 生成计算网格……168
4.4.2 计算模型的设置……173
4.4.3 求解条件的设置……177
4.4.4 计算结果后处理……182
第 5 章 无预混燃烧……185
5.1 无预混燃烧概述……185
5.2 模型设置……186
5.3 模型求解……199
5.4 计算结果后处理……202

第 6 章　CFX 软件与流体力学性能分析……205
6.1　ANSYS-BladeGen 功能简介及风机建模实例……205
6.1.1　BladeGen 功能简介……205
6.1.2　BladeGen 风机建模实例……206
6.2　ANSYS-Turbo grid 功能简介及风机网格划分实例……214
6.3　CFX 软件与流体力学性能分析实例……219
6.3.1　CFX-Pre 求解设置……219
6.3.2　CFX-Solver 求解设置……231
6.3.3　CFX-Post 后处理……234
第 7 章　其他后处理软件……246
7.1　Fieldview 软件介绍及实例操作……246
7.1.1　Fieldview 菜单栏……247
7.1.2　Fieldview 左侧工具栏……250
7.1.3　其他工具……252
7.1.4　散热器热性能计算后处理……253
7.1.5　F18 流场显示……262
7.2　TECPLOT 软件介绍及实例操作……272
7.2.1　TECPLOT 菜单栏……272
7.2.2　TECPLOT 左侧工具栏……278
7.2.3　计算后处理……280
7.2.4　导入 FLUENT 计算结果……297

第 1 章　计算流体力学基础



本章主要内容：

本章主要介绍计算流体力学的基本概念与原理，为后文各案例中的网格划分、求解设置和后处理等操作提供初步的理论知识。

本章学习目标：

✧ 流体力学的基本概念。
✧ 计算流体力学的基本概念。
✧ 流体运动及换热的基本控制方程。
✧ 湍流的数值模拟方法。
✧ 标准 $k-\varepsilon$ 模型方程。
✧ 近壁面处理函数。
✧ CFD 求解计算的方法。
✧ 网格。

1.1　流体力学的基本概念

流体力学是力学的一个分支，它主要研究流体本身的静止状态、运动状态以及流体和固体界壁间相对运动时的相互作用和流动的规律。与固体力学一样，流体力学的研究也有长远的发展历史，其中最具有代表意义的事件包括：18 世纪中叶，欧拉采用连续介质的概念把静流体中压力的概念推广到运动流体中，建立了欧拉方程，正确地用微分方程组描述了无黏流体的运动，因而成为流体力学主要创始人；1845 年，斯托克斯推导出黏性流体的一组基本运动方程，即目前广泛采用的纳维−斯托克斯方程，简称 N-S 方程。N-S 方程是流体力学的理论基础，欧拉方程正是 N-S 方程在黏度为零时的特例。

1．连续介质

1753 年，欧拉提出连续介质模型，即采用“连续介质”作为宏观流体模型，将流体看做为由无限多流体质点组成的稠密而无间隙的连续介质。也可以理解成，流体质点是指几何尺寸同流动空间相比是极小量，又含有大量分子的微元体。气体与液体均属于流体。

流体的密度定义为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中　ρ——流体密度，单位为kg/m^3；

m——流体质量，单位为 kg；

V——流体体积，单位为m^3。

对于气体，一般由气体状态方程定义：

$$pV = \rho RT \tag{1-2}$$

式中 p——气体压强，单位为 Pa；

V——气体体积，单位为m^3；

ρ——气体密度，单位为kg/m^3；

R——气体常数，空气的 R 值为 287J/(kg·K)；

T——气体温度，单位为 K。

2．流体的黏性

流体的黏性是指在做相对运动的两流体层的接触面或流体与固体的接触面上，存在一对等值且反向的力阻碍流体运动的现象。其产生原因是由于存在分子不规则运动的动量交换和分子间的吸引力。由黏性产生的作用力即黏性阻力，又称内摩擦力。牛顿内摩擦定律定义的两层流体间切应力的表达式为

$$\tau = \mu \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{1-3}$$

式中 τ——切应力，单位为 N；

μ——动力黏性系数，与流体物性和温度有关，单位为 kg/(m·s)；

$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$——垂直于两层流体接触面上的速度梯度，单位为$s^{-1}$。

黏性系数受温度的影响很大，当温度降低时，液体的黏性系数增大，黏性增强；而气体的黏性系数和黏性则均降低。在压强不是很高的情况下，黏性系数受压强的影响较小。

3．流体的导热性

流体的导热性是指当流体内部或流体与其他介质之间存在温度差时，温度较高区域与温度较低区域之间存在热量传递的现象。

热量传递有导热、对流和热辐射 3 种方式。流体流过壁面时，紧贴壁面的位置会形成层流底层，流体在该处流速很低，几乎可看做为零，故此处流体与壁面进行的是导热过程；层流之外的区域热传递方式主要是对流传热过程。

（1）导热

单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量。当物体的温度仅在 x 方向发生变化时，按照傅里叶定律（又称导热基本定律），热流密度的表达式为

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x} \tag{1-4}$$

式中 q——热流量，单位为W/m^2；

Φ——总换热量，单位为 W；

A——换热面积，单位为m^2；

λ——导热系数，单位为 W/(m·K)；

$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x}$——沿 x 方向的温度梯度，单位为 K/m，x 为面积的法线方向；

负号“－”表示热量传递方向与温度梯度方向相反。

（2）对流

通常，流体与固体表面间的对流换热量可用下式表达：

$$q = h(T_1 - T_2) \tag{1-5}$$

式中　q——热流量，单位为W/m^2；

h——换热系数，单位为$W/(m^2 \cdot K)$；

$T_1 - T_2$——流体与固体的温度差，单位为 K。

（3）热辐射

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下的黑体。实际物体辐射热流量的计算可以采用斯特番—波耳兹曼定律的经验修正公式：

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \tag{1-6}$$

式中　Φ——总换热量，单位为 W；

ε_1——物体 1 的发射率（又称黑度），其值总小于 1；

A_1——物体 1 的辐射面积，单位为m^2；

σ——斯特番—波耳兹曼常量（又称黑体辐射常数），是一个自然常数，$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$；

T_1、T_2——物体 1 和物体 2 的温度，单位为 K。

4. 可压流体与不可压流体

根据密度ρ是否为常数，可将流体分为可压流体与不可压流体两大类。当密度ρ为常数时，流体为不可压流体。一般地，水为不可压流体，空气为可压流体。有些可压流体在特定的流动条件下，可按不可压流体处理。

不可压流体的压力场是通过连续方程间接描述的，由于没有直接求解压力的方程，不可压流体的流动方程的求解尤为困难。

由于可压流体的连续方程中含密度ρ，因而把密度ρ视为连续方程中的独立变量进行求解，再根据气体的状态方程求出压力。

5. 层流流动与湍流流动

对于管内流动，科学家根据大量实验数据与相似理论得出，流动状态是由综合反映管道尺寸、流体物理属性、流动速度的组合量——雷诺数 Re 决定的。雷诺数 Re 的定义为

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \tag{1-7}$$

式中　ρ——流体密度，单位为kg/m^3；

u——平均流速，单位为 m/s；

d——管道直径，单位为 m；

μ——动力黏性系数，单位为 kg/(m·s)。

区分层流流动与湍流流动涉及临界雷诺数的概念。其中，由层流转变为湍流时对应的雷诺数称为上临界雷诺数，用 Re'_{cr} 表示；由湍流转变为层流时对应的雷诺数称为下临界雷诺数，用 Re_{cr} 表示。通过比较实际流动的雷诺数 Re 与两个临界雷诺数，即可确定黏性流体的流动状态。比较准则如下所示：

当 $Re < Re_{cr}$ 时，流动为层流状态。

当 $Re > Re'_{cr}$ 时，流动为湍流状态。

当 $Re_{cr} < Re < Re'_{cr}$ 时，流动可能为层流状态，也可能为湍流状态。一般称之为过渡状态。

在工程应用中，一般统一取临界雷诺数 $Re_{cr}=2300$，当 $Re<2300$ 时，为层流流动；当 $Re>2300$ 时，可认为流动为湍流流动。

不同雷诺数绕圆柱的流动效果见表 1−1。

表 1−1　不同雷诺数绕圆柱的流动效果

雷诺数的取值范围	绕圆柱的流动效果	备　　注
$Re < 5$		蠕动流（无分离）
$5\sim15 < Re < 40$		尾迹区有一对稳定涡
$40 < Re < 150$		层流涡街
$150 < Re < 3\times105$		分离点前为层流边界层，尾迹为湍流
$3\times105 < Re < 3.5\times106$		边界层转换为湍流
$Re > 3.5\times106$		湍流涡街，但涡间距离更近

6. 定常流与非定常流

根据流体流动的物理量（如速度、压力和温度等）是否随时间变化，可将流动分为定常流与非定常流两大类。当物理量不随时间变化，即 $\frac{\partial(\ )}{\partial t}=0$ 时，流动为定常流动；当流动的物理量随时间变化，即 $\frac{\partial(\ )}{\partial t}\neq 0$ 时，流动为非定常流动。定常流动也称为恒定流动或稳态流动；非定常流动也称为非恒定流动、非稳态流动或瞬态流动。

1.2　计算流体力学的基本概念

计算流体力学（CFD）是一种由计算机模拟流体流动、传热及相关传递现象的系统分析方法和工具。CFD 的优点是适应性强、应用面广，目前已广泛涵盖了高速铁路行业、汽车和航空业的空气动力学领域（如升力、阻力和倾覆力矩等）和内部流场分析、热管理等；电子和电器行业的电子设备换热分析（如冷板和换热器等的流动及传热计算）；建筑物的内外环境流场及换热分析（如风载荷和通风等）；流体机械的仿真分析（包括泵和风机等）；此外，CFD 在化学过程分析、环境工程、气象分析等方面也有较多应用。

CFD 分析一般应用在产品的概念设计、详细设计和改进设计等阶段。CFD 的基本思想

是：把原来在时间域和空间域上连续的物理量场，用一系列离散点上的变量值的集合来代替，并通过一定的原则和方式建立起反映这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组，获得场变量的近似解。

1．CFD 计算流程



CFD 计算主要包括前处理、求解和后处理 3 部分。

（1）前处理

据统计，CFD 计算中，前处理一般要占一半以上的时间，主要用于模型修整、面网格生成、体网格生成和计算域、边界条件的设定等。在前处理阶段，用户需要进行的工作包括：

① 定义所求问题的几何计算域；

② 将计算域划分为多个互不重叠的子区域，形成由单元组成的网格；

③ 对所要研究的物理或化学现象进行抽象，选择相应的控制方程；

④ 定义流体的属性参数；

⑤ 为计算域边界处的单元指定边界条件；

⑥ 对于瞬态问题，指定初始条件。

（2）求解

目前，各 CFD 软件采用的求解方法均按如下步骤运行：采用简单函数近似表示未知的流动变量；将近似函数代入流动控制方程和所得到的数学式进行离散化；求解代数方程。其差别主要是流动变量的近似方法和离散化过程的不同。

目前，流动和传热问题中最有效的数值计算方法是有限体积法，该方法又称为控制体积法，是一项经过校核且发展很好的通用 CFD 技术，多数 CFD 软件（如 STAR-CCM+、FLUENT、CFX 和 PHOENICS 等）都采用此方法为核心算法。其基本思想为：将计算区域划分为网格，并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积；将待解的偏微分方程对每一个控制体积积分，从而得出一组离散方程，其中的未知量是网格点上的特征变量。为求出控制体积的积分，必须假定特征变量值在网格点之间的变化规律。从积分区域的选取方法看，有限体积法属于加权余量法中的子域法；从未知解的近似方法看，有限体积法属于采用局部近似的离散方法。简言之，有限体积法的基本思想就是子域法加上离散。

有限体积法主要包括以下求解步骤：

① 在计算域的所有控制容积内对流动控制方程进行积分；

② 离散化网格，将积分方程中的对流项、扩散项和源项用有限差分公式近似表示，将积分方程转变为代数方程组；

③ 迭代求解该代数方程组。

（3）后处理

由于计算机技术的不断进步，CFD 软件提供的数据可视化技术和工具越来越多，如计算域和网格显示；等值线图（如云图，包括压力云图、温度云图和速度云图等）；矢量图（如速度矢量图等）；视角变换（平移、缩放、旋转）；颗粒追踪；动画输出等。

2．离散化

离散化是指将求解区域的空间分割为网格，以网格上的离散的值来近似空间上连续的值。每一个解析网格即一个控制体，如图 1-1 所示。

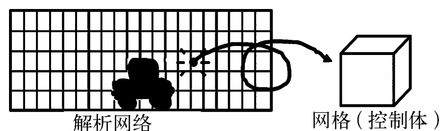


图 1–1　控制体

离散化一般的实施过程是：把所计算的区域划分成许多个互补重叠的子区域，确定每个子区域中的节点位置及该节点所代表的控制体积。区域离散化过程结束后，可得到以下 4 种几何要素：

1）节点，即需要求解的未知物理量的几何位置；

2）控制容积，即应用控制方程或守恒定律的最小几何单位；

3）界面，规定了与各节点相对应的控制容积的分界面位置；

4）网格线，即沿坐标轴方向联结相邻两节点而形成的曲线族。

计算时，从边界条件处获得物理量的值，在相邻网格之间有着质量、动量和能量的传递。随着计算的推进，可得到全部网格上流速、压力和密度等物理量的值。离散化的原理如图 1–2 所示。

以网格上离散的值构建差分方程的方法称为差分格式，离散网格上的差分方程是连续空间上的微分方程的近似。使用不同的差分格式，计算的精度和稳定性都有变化。

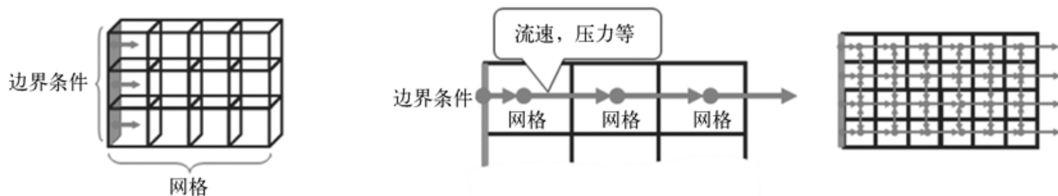


图 1–2　离散化的原理

理想的离散格式通常要求既具有稳定性，又具有较高精度，同时还能适应不同的流动形式。实际上，这种离散格式很难实现。表 1–2 列出了常用离散格式的性能对比。

表 1–2　常用离散格式的性能对比

离散格式	稳定性及条件	精度与经济性
中心差分	条件稳定 $Pe \leqslant 2$	在不发生振荡的前提下，可获得较准确的计算结果
一阶迎风	绝对稳定	当 Pe 较大时，假扩散严重。为避免此问题，需要加密网格
混合格式	绝对稳定	当 $Pe \leqslant 2$ 时，性能同中心差分；当 $Pe>2$ 时，性能同一阶迎风
指数格式	绝对稳定	精度高，主要适用于无源项的对流扩散问题
乘方格式	绝对稳定	性能同指数格式，但比指数格式省时
二阶迎风	绝对稳定	比一阶迎风精度高，仍有假扩散问题
QUICK	条件稳定 $Pe \leqslant 8/3$	可减小假扩散误差，精度较高，应用广泛，主要用于四边形或六面体网格
改进的 QUICK	绝对稳定	性能同 QUICK 格式，不存在稳定性问题

注：1．Pe 数表征某点处的对流和扩散的强度比例。

2．假扩散现象是由于对流扩散方程中一阶导数项的离散格式的截断误差小于二阶而引起较大数值计算误差的现象。

在表 1−1 的基础上，可总结出以下规律：

1）在满足稳定性条件的前提下，一般截断误差阶数较高的格式具有较高的计算精度，如具有三阶截断误差的 QUICK 格式，通常可以获得较高的计算精度。选用低阶截断误差格式时，应将网格划分得足够密，以减小假扩散的影响。

2）稳定性与精确性常常互相矛盾。精确度较高的格式，如 QUICK 格式等，都不是无条件稳定，而假扩散现象相对严重的一阶迎风格式则是无条件稳定。其中的一个原因是，为了提高离散格式的截断误差等级，通常需要从所研究的节点两侧取用一些节点来构造该节点上的导数计算式，而当导数计算式中出现下游节点且其系数为正时，迁移特性遭到破坏，因此格式只能是条件稳定。

3）一阶和二阶差分格式均可应用于二维和三维问题。

3．计算流体力学的研究方法

CFD 解析方法采用数值方程式表示实际流体。为了使其简化，往往采用位势流理论、边界层近似和完全气体近似等，进而导入相应的湍流数学模型，并进行数值计算。由于计算是基于对实际流体的近似进行，故应考虑计算前提近似的影响。根据计算结果的精确度、可信性、计算机条件和计算经验等确定合适的数值解法，然后编写程序代码，利用计算机进行求解计算和后处理。

数值计算方法的实质是把描述空气运动的连续介质数学模型离散成大型代数方程组，建立可在计算机上求解的算法。通过偏微分方程的离散化和代数化，将无限信息系统变为有限信息系统（离散化），把偏微分方程变为代数方程（代数化），再通过采用适当的数值计算方法，求解方程组，得到流场的数值解。离散的实质解通常以两种形式给出：网格上的近似值，如差分法等；单元中易于计算的近似表达式，如有限元和边界元等。

CFD 是建立在全 Navier−Stokes 方程（简称 N-S 方程）近似解基础上的计算技术。根据近似解的公差等级，可把 N-S 方程的解法分为以下 4 类：

1）线性非黏性流方法；

2）非线性非黏性流方法；

3）平均雷诺数基础上的 N-S 方程解法；

4）全 N-S 方程解法。

CFD 数值计算方法主要包括有限差分法（FDM）、有限元法（FEM）和边界体积法（BIM）等。其中，有限差分法包括有限体积法（FVM）、流线曲率法（SCM）、质量网格法（PIC）和流体网格法（FLIC）等，这些方法均为有限差分法的一种或其变形的一种方法。3 种 CFD 数值计算方法的比较见表 1−3。

表 1−3　3 种 CFD 数值计算方法的比较

比　较　项	有限差分法	有 限 元 法	边界体积法
网格分割	规则的格子普遍用于边界的网格分割	可自由分割为三角形、四边形、三棱柱、六面体等网格	边界的面元分割
建立一次方程式的系数行列	大型、带成分不密集的行列	大型、带成分不密集的行列	小型、成分密集的行列

（续）

比 较 项	有限差分法	有 限 元 法	边界体积法
主要特征	最基本的标准解法	精确度高，对已有程序使用方便，计算量大	输入数据少
适用性	适用性广，用于伴有冲击波的超声速流边界层流，LES 计算	适用于复杂形状的边界	适用于定常流中的流体自由表面流

由于有限体积法应用较广泛，也有人将 CFD 数值计算方法分为有限差分法、有限元法和有限体积法 3 类。

流场计算分析中求解 N-S 方程的应用情况见表 1−4。

表 1−4 流场计算分析中求解 N-S 方程的应用情况

假 设	导 出 方 程	CFD 方法
无黏流	欧拉方程	欧拉法
无旋流	拉普拉斯方程	涡格法 边界层法 面元法
时均流	雷诺方程	k-Epsilon 模型 低雷诺数 k-Epsilon 模型 各向同性 k-Epsilon 模型 雷诺应力模型
空间平均		大涡模型
无处理		直接模型

1.3 流体运动及换热的基本控制方程

散热器内的空气流动、小汽车和高速动车组外流场的空气流动特性，其实质均是流体流动与换热问题。流体运动是最复杂的物理行为之一，与结构设计领域中应力分析等问题相比，其建模与数值模拟要困难得多。然而，对任何复杂的湍流流动，N-S 方程都是适用的。流体运动及换热的控制方程如下所示。

连续方程的表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1-8}$$

式中 ρ——流体的密度；

u_i——流体速度沿 i 方向的分量。

连续方程又称为质量守恒方程。

动量守恒方程的表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i \tag{1-9}$$

式中 p——静压力；

τ_{ij}——应力矢量；

ρg_i——i 方向的重力分量；

F_i——由于阻力和能源而引起的其他能源项。

能量守恒方程表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h)=\frac{\partial}{\partial x_i}(k+k_t)\frac{\partial T}{\partial x_i}+S_h \quad (1\text{-}10)$$

式中 h——熵；

k——分子传导率；

k_t——由于湍流传递而引起的传导率；

S_h——定义的体积源。

一般流体沿 i、j、k 方向的速度分量 u_i、u_j、u_k 对应 3 个动量守恒方程。由以上的质量守恒、动量守恒及能量守恒方程可知，共有 u_i、u_j、u_k、p、T、ρ 6 个未知量，为了使方程封闭，还需要补充一个联系 p 和 ρ 的状态方程式（1-2），方程组才能封闭。

流体的宏观性质，如扩散、黏性和热传导等，是分子输运性质的统计平均。由于分子的不规则运动，在各层流体间交换着质量、动量和能量，使不同流体层内的平均物理量均匀化，这种性质称为分子运动的输运性质。结合前述流体力学的基本概念，质量输运在宏观上表现为扩散现象，动量输运表现为黏性现象，能量输运表现为热传导现象。

对于所有的流动，FLUENT 都是解质量和动量守恒方程。对于包括热传导或可压性的流动，需要解能量守恒的附加方程。对于包括组分混合和反应的流动，需要解组分守恒方程或者使用 PDF 模型来解混合分数的守恒方程以及其方差。当流动是湍流时，还要解附加的输运方程。

1.4 湍流的数值模拟方法

层流和湍流是流体运动的两种基本形式。1883 年，雷诺揭示了黏性流动这两种不同本质的流动形态。自此，世界各国学者对湍流进行了持续研究，取得不少进展，解决了很多工程领域的难题。但由于湍流运动极其复杂，其基本机理至今未能完全掌握，而且不能准确地定义并定量地给出湍流的运动特性。目前，一般将湍流的主要特征归结为随机性、扩散性、有涡性和耗散性。

湍流出现在速度变动的地方，这种波动引起流体介质之间动量、能量和浓度的变化，而且引起了数量的波动。因此，湍流是一种高度复杂的三维非稳态、带旋转的不规则流动。在湍流中，流体的各种物理参数，如速度、压力和温度等都随时间与空间发生随机变化。从物理结构上说，可以把湍流看成是由各种不同尺寸的涡旋叠合而成的流动，这些涡旋的大小及旋转轴的方向分布是随机的。大尺度的涡旋主要由流动的边界条件决定，其尺寸可与流场的大小相比拟，是引起低频脉动的原因；小尺度的涡旋主要由黏性力决定，其尺寸可能只有流场尺度的千分之一的量级，是引起高频脉动的原因。大尺度的涡旋破裂后形成小尺度的涡旋。较小尺度的涡旋破裂后形成更小尺度的涡旋。因而，在充分发展的紊流区域内，流体涡旋的尺寸可在相当宽的范围内连续变化。大尺度的涡旋不断从主流获得能量，通过涡旋间的相互作用，能量逐渐向小尺度的涡旋传递。最后，由于流体黏性的作用，小尺度的涡旋不断消失，机械能就转化（或称耗散）为流体的热能。同时，由于边界的作用、扰动及速度梯度

的作用，新的涡旋又不断产生，这就构成了湍流运动。由于湍流是小尺度、高频率的，所以在实际工程计算中直接模拟对计算机的要求会很高。实际上，瞬时控制方程可能在时间上和空间上是均匀的，或者可以人为地改变尺度，修改后的方程耗费较少的计算机资源。但是，修改后的方程可能包含有我们不清楚的变量，湍流模型需要用已知变量来确定这些变量，目前能够用于工程计算的湍流数值计算方法是雷诺平均法，即只计算大尺度平均流动，所有湍流脉动对平均流动的作用用湍流模式理论加以封闭，使计算量大为减少。

湍流的数值模拟方法主要有以下 3 种：

（1）直接模拟法

直接模拟法（Direct Numerical Simulation，DNS）是用三维非稳态的 N-S 方程对湍流进行直接数值计算的方法。要对高度复杂的湍流运动进行直接的数值计算，必须采用很小的时间与空间步长，才能分辨出湍流中详细的空间结构及变化剧烈的时间特性。直接模拟法的最大好处是无需对湍流流动做任何简化或近似，理论上可得到相对准确的计算结果，但湍流的直接模拟法对内存空间及计算速度的要求非常高，目前还无法用于真正意义上的工程数值计算，但大量的探索性工作正在进行之中。

（2）大涡模拟法

湍流流动的仿真计算，需要计算域的尺寸应大到足以包含湍流运动中出现的最大涡，同时计算网格的尺度应小到足以分辨最小涡的运动。按照湍流的涡旋学说，湍流的脉动与混合主要是由大尺度的涡造成的。大尺度的涡从主流中获得能量，它们是高度的非各向同性，而且随流动的情形而异。大尺度的涡通过相互作用把能量传递给小尺度的涡。小尺度涡的主要作用是耗散能量，它们几乎是各向同性的，而且不同流动中的小尺度涡有许多共性。大涡模拟法（Large Eddy Simulation，LES）就是用非稳态的 N-S 方程来直接模拟大尺度涡，但不直接计算小尺度涡，小涡对大涡的影响通过近似的模型来考虑，即在涡黏性的基础上，把湍流脉动所造成的影响用一个湍流粘性系数，即涡黏性来描述。大涡模拟法对计算机内存及速度的要求也比较高，但远低于直接模拟法对计算机资源的要求。

（3）雷诺时均方程法

N-S 方程的非线性使得用解析的方法很难精确描写三维时间相关的全部细节，这对于解决实际问题意义不大。应用雷诺时均方程法（Reynolds-Averaged Navier-Stokes，RANS）是目前工程湍流计算中采用的基本方法，其做法是：将非稳态控制方程对时间作平均，在所得出的关于时均物理量的控制方程中包含了脉动量乘积的时均值等未知量，于是所得方程的个数就小于未知量的个数，而且不可能依靠进一步的时均处理使控制方程封闭。要使方程组封闭，必须做出假设，建立模型，这种模型把未知的、更高阶的时间平均值表示成较低阶的计算中可以确定的量函数。Spalart-Allmaras 模型和 k–ε 模型等 k–ω 模型均属于应用雷诺时均方程法。

应用雷诺时均方程法又分雷诺应力方程法和湍流黏性系数法两大类。雷诺应力方程法对于在时均过程中引入的两个脉动值乘积的时均项再建立偏微分方程。在建立两个脉动值乘积的时均值的方程的过程中，又会引入 3 个脉动值乘积的时均值。为了使方程组封闭，可对 3 个脉动值乘积的时均值建立微分方程，而在这一过程中又出现了 4 个脉动速度乘积的时均值，这在理论上是一个不封闭性的困难。我国著名科学家周培源教授于 20 世纪 40 年代，在

4 个脉动速度乘积这一层次上加上了一个涡量脉动平方平均值的方程式，使雷诺应力方程封闭，此即 17 方程模型，其中包括了两个速度脉动值时均值的方程和 3 个速度脉动值乘积时均值的方程。随着计算机技术的飞速发展，雷诺应力方程模型在湍流数值计算中的应用日益广泛，特别是其中对二阶矩建立微分方程，对三阶矩引入近似处理的方法已经应用到工程数值计算中。湍流动力粘度法又称湍流黏性系数法，是目前工程流动与数值计算中应用最广的方法。但由于目前的湍流模型基本上都是基于低速不可压缩模式发展的，工程中一般选用广为应用的标准 k–ε 模型。

1.5　标准 k-ε 模型方程

湍流流动是非常复杂的流动，计算湍流运动时，需要附加湍流方程。模型方程的选取要视具体情况而定，在此以 $k-\varepsilon$ 双方程模型为例。本节给出的 k-ε 模型方程是针对湍流发展非常充分的湍流流动建立的，适用于高 Re 数的湍流计算模型。

标准 k-ε 模型是半经验公式，主要基于湍流动能和扩散率。湍流动能方程——k 方程是一个精确方程，而湍流耗散率方程——ε 方程是一个由经验公式导出的方程。如不考虑用户自定义的源项，标准 k-ε 模型方程如式（1−11）和式（1−12）所示。

湍动动能 k 方程：

$$\rho\frac{Dk}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu_l+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon \tag{1−11}$$

湍动能耗散率 ε 方程：

$$\rho\frac{D\varepsilon}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{1−12}$$

式中　μ_l——层流黏性系数；

μ_t——湍流黏性系数；

$$\mu_\mathrm{t}=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1−13}$$

G_k——由层流速度梯度产生的湍流动能；

G_b——由浮力产生的湍流动能；

$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$、σ_k和σ_ε——经验常数；

C_μ——湍流常数。

有效的黏性系数：

$$\mu=\mu_t+\mu_l \tag{1−14}$$

k–ε 模型假定流场完全是湍流，分子之间的黏性可以忽略。因而，标准 k–ε 模型只对完全湍流的流场有效。

模型常量是从空气、水的基本湍流试验中得来的，FLUENT 软件一般取值为

$$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$$

以上方程组是非线性二阶偏微分方程组，对大多数工程问题，无法获得精确解析解，只能用 CFD 数值模拟的方法求解。数值方法的实质是离散化和代数化。数值计算就是将描述

物理现象的偏微分方程在一定的网格系统内离散，用网格节点处的场变量值近似描述微分方程中各项所表示的数学关系，按一定的数学原理构造与微分方程相关的离散代数方程组，引入边界条件后求解离散代数方程组，得到各网格节点处的场变量分布，用这一离散的场变量分布近似代替原微分方程的解析解。

将标准$k-\varepsilon$模型用于强旋流或带有弯曲壁面的流动时，会出现一定失真。针对这种问题，后来发展的RNG $k-\varepsilon$模型通过修正湍流粘度，考虑了平均流动中的旋转及旋转流动情况，且在ε方程中增加了一项反应主流的时均应变率，与流动相关保持相关，也在同一问题中保证了还是空间坐标的函数。另外，Realizable $k-\varepsilon$模型也在湍流粘度计算公式上引入了旋转和曲率的影响因素，在k方程中不再包含G_k项，以更好地模拟各种类型的能量传递。因此，Realizable $k-\varepsilon$模型能更好地解决旋转均匀剪切流、管内流动、边界层流动和带有分离的流动等。

1.6　近壁面处理函数

湍流流动受壁面影响很大，很明显，平均流动区域将由于壁面不光滑而受到影响。当然，湍流还受到壁面产生的其他影响。在离壁面很近的地方，黏性力将抑制流体切线方向速度的变化，而且流体运动受壁面阻碍，从而抑制了正常的波动。

在近壁面的外部区域，湍流动能受平均流速的影响而增大，湍流运动加剧。LES 模型仅适用于湍流核心区域（一般都远离壁面），应该考虑怎样使这些模型适用于壁面边界层处的流动。如果近壁面的网格划分足够好，Spalart-Allmaras 和 $k-\omega$模型可以解决边界层的流动。

前面介绍的 $k-\varepsilon$模型均为针对充分发展的湍流、高 Re 数的湍流模型，但对于近壁区的流动，Re 数较低，湍流发展并不充分，湍流的脉动影响不如分子黏性的影响大。要对近壁区内的流动进行模拟计算，必须对前面所述的 $k-\varepsilon$方程进行修正。壁面函数法和低 Re 数 $k-\varepsilon$模型均可有效解决近壁区及低 Re 数情况下的流动计算问题。

在无滑移壁面附近存在很强的变量梯度，此时，黏性效应对运输过程有很大影响，在数值模拟过程中需考虑壁面的黏性效应和边界层内快速变化的变量的求解这两大问题。

研究表明，对于在固体壁面上充分发展的湍流流动，沿壁面法线方向可将流动区域划分为壁面区和核心区。核心区的流动可以认为是完全湍流区。壁面区又可分为黏性底层、过渡层和对数律层。

黏性底层在最里层，又叫黏性力层，流动区域很薄，在这个区域里，黏性力在动量、热量及质量交换中起主导作用，湍流切应力可以忽略，因此流动几乎是层流流动，平行于壁面的速度分量沿壁面法线方向呈线性分布。

过渡层处于黏性底层的外面，其中黏性力与湍流切应力的作用相当，流动状况比较复杂，很难用一个公式或定律来表述。由于过渡层的厚度极小，故计算中将其归入对数律层。

对数律层处于最外层，其中黏性力的影响不明显，湍流切应力占主导地位，流动处于充分发展的湍流状态，流速分布接近对数关系。

为了建立壁面函数，现引入两个无量纲参数u^+和y^+，分别表示速度和距离，即

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \tag{1-15}$$

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho u_\tau}{\mu} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{1-16}$$

式中 u——流体的时均速度；

u_τ——壁面摩擦速度，$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$；

τ_w——壁面切应力；

Δy——到壁面的距离。

大量实验表明，近壁面区域可以分成 3 层区域，如图 1-3 所示，以$\ln y^+$为横坐标，u^+为纵坐标，将壁面区内划分为 3 个子层及核心区内的流动。图 1-3 中的小三角形及小空心圆代表在两种Re数下实测得到的速度值u^+，直线代表对速度进行拟合后的结果。

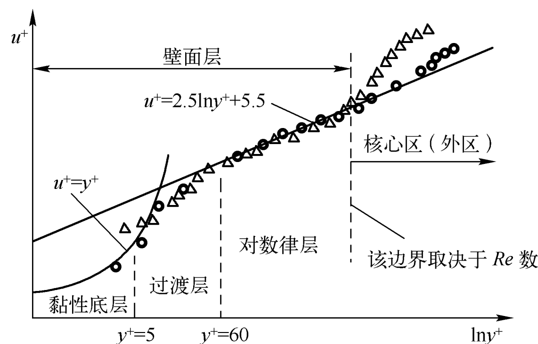


图 1-3 壁面区 3 个子层的划分与相应的速度

根据普朗特的边界层理论，黏性较小的流体绕流物体时，黏性的影响仅限于贴近物面的薄层内，而在薄层之外可以忽略。在这个薄层内，形成一个从固体壁面速度为零到外流速度的速度梯度区，这一薄层即边界层。

合适的边界层网格分布是用好湍流模型的关键因素之一。边界层网格质量的控制可通过控制 y^+ 值范围来实现，一般对于壁面函数法，要求 $20 < y^+ < 100$；对低雷诺数模型，要求 $y^+ < 2$。根据要控制的 y^+ 值范围，可确定边界层内网格节点和壁面间的最小距离 Δy，按式（1-17）确定。

$$\Delta y = \frac{\sqrt{80} L y^+}{Re_L^{13/14}} \tag{1-17}$$

式中 L——特征长度，单位为 m；

Re——特征长度处对应的雷诺数。

假设近壁面的速度分布符合对数函数，可以在边界层内计算得出流体的剪切应力，该函数即壁面函数。通常，近壁面区域流动分析有两种方法：壁面函数法和低 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型法。

（1）壁面函数法

壁面函数法不对黏性影响比较明显的区域（黏性底层和过渡层）进行求解，而是用一组半经验公式（即壁面函数）将壁面上的物理量与湍流核心区内的相应物理量联系起来。采用壁面函数法的半经验公式可解决壁面对流动的影响，对受黏性力影响的区域（黏性力层及过渡层），其壁面方程的运用能够很好地修正湍流模型。对于大多数高雷诺数的流动，壁面函

数法能充分节省计算资源，因为在近壁面黏性力影响区域，由于变量变化太快，不需要解决，所以这种方法经济、实用而且很精确，很受欢迎。

壁面函数法的基本思想为：对于湍流核心区的流动，采用 $k-\varepsilon$ 模型求解，而不求解壁面区，换为直接采用半经验公式将壁面上的物理量与湍流核心区内的求解变量联系起来，这样不经过对壁面区内的流动进行求解，就可以直接得到与壁面相邻控制容积的节点变量值。

划分网格时，壁面函数法不需加密壁面区，只需将第一个内节点布置在对数律成立的区域内，即放置到湍流充分发展区域，如图 1-4a 所示。图中的阴影部分为壁面函数公式有效的区域，阴影以外的网格区域为采用高 *Re* 数 $k-\varepsilon$ 模型进行求解的区域。壁面函数如同一架桥梁，将壁面值同相邻控制容积的节点变量值联系起来。

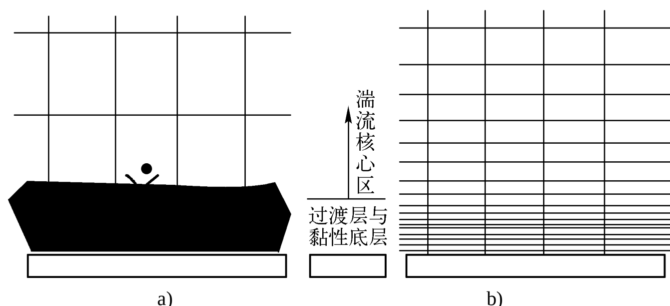


图 1-4　求解壁面区流动的两种方法所对应的计算网格

a) 壁面函数法对应的计算网格　b) 低 *Re* 数 $k-\varepsilon$ 模型对应的计算网格

通常用壁面函数来表示边界层的速度、温度和湍流能量等物理量的分布。在边界层区域，流体的湍流效应十分显著，高雷诺数模型在此区域内就不再适用了，有时为了减少在壁面附近网格的数量，又不得不采用高雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型，故采用壁面函数法来计算壁面处的湍流物理量。对于大多数高雷诺数的流动，壁面方程法能充分节省计算资源，因为在近壁面粘性力影响区域，由于变量的变化太快，不需要解决，所以这种方法经济、实用，而且很精确，很受欢迎，对于这种工业上的流动模拟，这是一个很好的方法。然而，壁面方程法运用在低雷诺数流动区域却并不理想，其所依赖的壁面方程的假设不再成立，在这种情况下，需要用“近壁面模型”来解决黏性力影响区域的流动。

（2）低 *Re* 数 $k-\varepsilon$ 模型法

壁面函数法的表达式主要根据简单平板流动边界层的实验资料归纳获得，并未对壁面区内部，尤其是黏性底层内的流动进行细致研究，分子的黏性作用没有得到充分考虑。为了让基于 $k-\varepsilon$ 模型的数值计算能从高 *Re* 数区域一直延伸到固体壁面上（该处 *Re* 数为零），有学者提出低 *Re* 数的流动主要体现在黏性底层中，流体的分子黏性起着绝对重要的作用，因此，必须对高 *Re* 数 $k-\varepsilon$ 模型进行以下 3 方面的修正，才能使其可用于计算各种 *Re* 数区域的流动。

① 为体现分子黏性的影响，控制方程的扩散系数项必须同时包括湍流扩散系数与分子扩散系数两部分；

② 控制方程的有关系数必须考虑不同流态的影响，即在系数计算公式中引入湍流雷诺数 Re_t；

$$Re_t = \frac{\rho k^2}{\eta \varepsilon} \tag{1-18}$$

③ 在 k 方程中考虑壁面附近湍动能的耗散不是各向同性这一个因素。

对于壁面边界，通常指定壁面处流体的切向速度u_w为零，即壁面无滑移边界条件；与壁面垂直的速度 v ，由于在壁面附近 $\partial u / \partial x \cong 0$ ，根据连续性方程， $\partial v / \partial y \cong 0$ 。对于无粘性流动，流体在壁面处无剪切运动，即壁面为滑移边界条件，此处控制体界面上的剪切动量通量和温度梯度为零。

在固体壁面的黏性底层中，流动与换热的计算可以采用低雷诺数 k-ε 模型或壁面函数法。采用低雷诺数 k-ε 模型时，要在黏性底层中布置比较多的节点。采用高雷诺数 k-ε 模型，在黏性底层内不布置任何节点，把与壁面相邻的第一个节点布置在旺盛湍流区域内。

有文献指出，当局部湍流的 Re_t 数小于 150 时，应使用低 Re 数 k-ε模型法，而非高 Re 数 k-ε模型法。

1.7 CFD 求解计算的方法

流场计算求解的本质是对离散方程组的求解。离散方程组的求解方法包括耦合求解法和分离求解法两种，如图 1–5 所示。

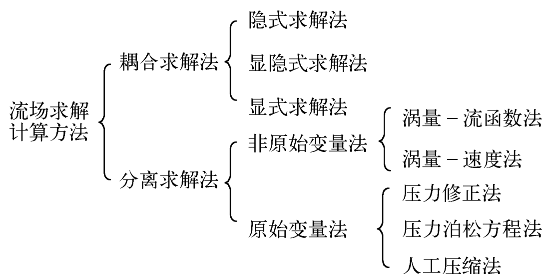


图 1–5 离散方程组的求解方法

1. 耦合求解法

耦合求解法最大的特点为联立求解离散方程组，以获得各变量值（u、v、w、p），具体求解过程如下：

1）假定初始压力和速度，确定离散方程的系数和常数项。

2）联立求解连续方程、动量方程和能量方程。

3）求解湍流方程及其他方程。

4）判断当前时间步上的计算是否收敛。如不收敛，返回至步骤 2），进行迭代计算；如收敛，重复以上步骤，计算下一时间步的各物理量值。

耦合求解法可分为隐式求解法（所有变量整场联立求解）、显隐式求解法（部分变量整场联立求解）和显式求解法（在局部地区，如某个单元，对所有变量联立求解）。对于显式求解法，在求解某个单元时，通常要求相邻单元的物理量值已知。

耦合求解法的计算效率低，内存消耗大。当流体的密度、能量、动量存在相互依赖关系时，采用耦合式解法具有较大优势，适于高速可压流动等。在耦合式解法中，隐式求解法应

用较普遍，而显式求解法仅用于动态性极强的场合，如激波捕捉等。

2. 分离求解法

分离求解法不直接求解联立方程组，而是按照顺序逐个求解各变量的离散方程组。根据是否直接求解原始变量（u、v、w、p），又可分为非原始变量法和原始变量法两大类。

非原始变量法包括涡量-流函数法和涡量-速度法两种。

涡量-流函数法不直接求解原始变量 u、v、w 和 p，而是求解旋度 ω 和流函数 Ψ；涡量-速度法不直接求解流场的原始变量 p，而是求解旋度 ω 和速度 u、v、w。这两种方法的共同点为

1）方程中不出现压力项，可避免因求解压力带来的问题。

2）由于三维流动不存在流函数，所以不易扩展到三维情况。

3）对于固壁面边界计算，其上的旋度极难确定，没有适宜的固体壁面上的边界条件，往往使得涡量方程的数值解发散或不合理。

原始变量法包括压力泊松方程法、人工压缩法和压力修正法。

压力泊松方程法通过对方程取散度，将动量方程转变为泊松方程，然后求解泊松方程。人工压缩法主要是受到可压缩性气体可以通过联立求解速度分量与密度的方法来求解的启发，引入人工压缩性和人工状态方程，以此对不可压流体的连续性方程进行修正，并引入人工密度项，将连续性方程转化为求解人工密度的基本方程。但这种方法要求时间步长必须很小，因而限制了其应用范围。

压力修正法是目前工程上使用最广泛的流场求解计算方法。其实质是迭代法，即在每一时间步长的运算中，先给出压力场的初始值，进而求出速度场，再求解根据连续方程导出的压力修正方程，对假设的压力场和速度场进行修正。如此循环往复，以求得压力场和速度场的收敛解。

压力修正法有多种实现方式，其中压力耦合方程组的半隐式方法（SIMPLE 算法）应用最为广泛，也是各种 CFD 软件普遍采用的算法。

3. SIMPLE 求解方法

SIMPLE（Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations）算法是一种半隐式分离求解法，它属于基于有限体积法的压力修正法，是目前工程上应用最为广泛的一种流场计算方法。它的核心是采用“猜测-修正”的过程，在交错网格的基础上计算压力场，从而达到求解动量方程的目的。SIMPLE 算法的基本思想是利用计算网格把流动区域分为离散的控制体积；在每个控制体积上积分控制方程，形成诸如速度、压力和温度等的未知离散变量的代数方程；把离散的非线性方程组线性化；求解该方程组，得到更新的变量值。在此，把数值解定义在网格中点（格心）上。在离散方程时，对流项采用二阶迎风格式，黏性项采用二阶中心差分格式。

每一次计算迭代的步骤如下：

1）计算结果是在目前的基础上不断更新。开始时，计算变量以初始流场为基础开始更新计算。

2）利用目前的压力值和表面质量流量，依次求解 3 个速度分量 u、v、w 的动量方程，以获得新的速度流场。

3）由于新获得的速度流场可能不满足连续方程，这时求解由连续方程和动量方程线性化而推导出来的压力纠正方程，从而对压力、速度场和表面质量流量产生必要的纠正，以满足连续方程。

4）利用其他变量更新的数值求解湍流模型方程及辐射方程。

5）检查方程的收敛精度是否满足要求。

如果不满足收敛精度，则重新迭代计算，直到满足收敛精度为止。

1.8 网格

计算网格的合理划分和高质量是 CFD 计算的前提条件。即使在 CFD 技术高度发达的国家，网格生成仍占整个 CFD 计算任务所需人力时间的 60%～80%。目前，随着硬件资源的更新换代，计算能力不断提高，复杂外形的网格生成技术已经成为 CFD 技术推广的一个巨大障碍，同时也是影响 CFD 计算的关键技术之一。网格品质的好坏直接影响到数值解的计算精度，而且这种影响在许多情况下是决定性的。因此，网格生成受到世界各国 CFD 工作者和工业部门的重视。

采用数值方法求解控制方程时，首先是将控制方程在空间区域上进行离散，然后求解得到离散方程组。而要将控制方程进行空间离散，就要划分网格。现已发展出多种区域离散化的网格生成方法，统称为网格生成技术。网格生成技术是计算流体力学中重要的组成部分，为了得到高精度的数值结果，除了高精度的数值算法外，网格的优劣也有重要的影响。

按网格点之间的相邻关系，可将计算网格分为结构化网格、非结构化网格和混合网格。混合网格是结构网格和非结构网格的混合。

1.8.1 结构化网格

结构化网格如图 1-6 所示，网格点之间的邻接是有序而规则的，除了边界点外，内部网格点都有相同的邻接网格数（一维为 2 个、二维为 4 个、三维为 6 个）。结构化网格的拓扑结构具有严格的有序性。网格的定位能够用空间上的 3 个指标 i，j，k 识别，且网格单元之间的拓扑连接关系是简单的 i，j，k 递增或递减的关系，在计算过程中不需要存储它的拓扑结构。当流动区域易于被结构化网格所剖分、流动结构不需要做自适应处理时，结构化网格被研究者广泛采用。

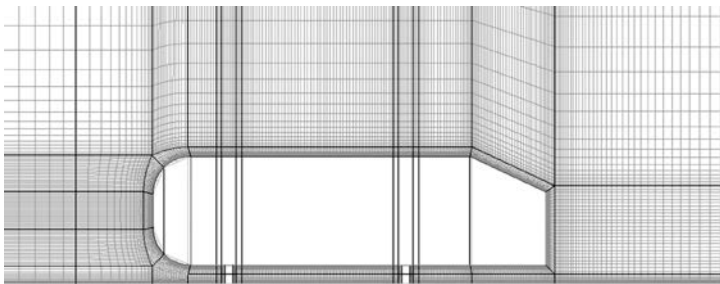


图 1-6 结构化网格

对于结构化网格，按拓扑结构的不同一般可以分为 O 型、C 型和 H 型 3 种，如图 1−7 所示。O 型拓扑结构适合于两端都是钝截面的物体，如圆形或椭圆形截面物体；C 型拓扑结构适合于一端是钝头，而另一端是尖截面的物体，如锥形截面物体；H 型拓扑结构适合于两端都是尖截面的物体，如菱形截面的物体。

采用不同的网格拓扑结构生成的网格形状不同，网格的计算效率也有差异。因此，要生成网格，首先要分析其网格的拓扑结构。

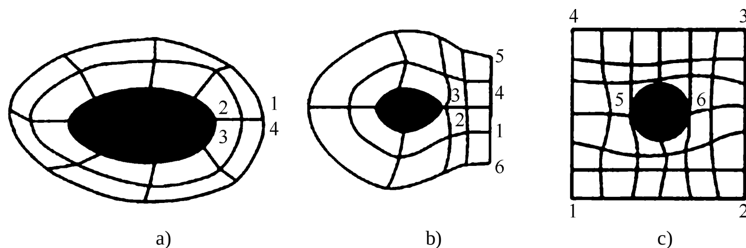


图 1−7　3 种网格示意图

a) O 型网格　b) C 型网格　c) H 型网格

结构化网格数据组织方便，计算效率和计算精度高。随着近几十年在结构网格生成技术方面的不断突破，目前发达国家各主要飞机公司，如 Boeing（含 Douglas），Airbus 和 MBB 等，用于军机、民机型号气动设计的骨干软件都采用结构化网格；结构化网格的拓扑结构相当于矩形域内的均匀网格，其节点定义在每一层的网格线上，因而其存储比较简单，所需的存储空间也相对较少，但它对复杂几何外形的网格生成比较困难。

1.8.2 非结构化网格

非结构化网格节点之间的邻接是无序的、不规则的，每个网格点可以有不同的邻接网格数。非结构化网格如图 1−8 所示。

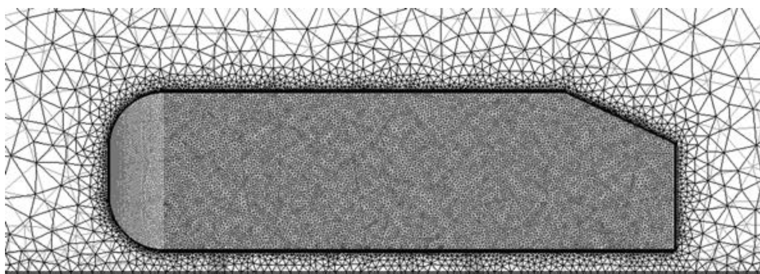


图 1−8　非结构化网格

与结构化网格相比，非结构化网格有以下优点：

1）能够离散具有复杂外形的区域，因为非结构化网格单元可以在任意计算区域中完全填充到整个空间，能相当精确地表示出物体的边界，从而保证在边界处的初始准确度。

2）能够快速地在网格中增加、删除节点，处理动边界问题比较方便。

3）能够很容易地采用自适应网格方法提高解的质量。

当然，非结构化网格生成方法也存在先天的不足，那就是它需要较大的内存空间和较长的 CPU 时间，计算分辨率较差，且不适于黏性流场的求解。目前，非结构化网格方法已广泛应用于定常气动流场数值模拟中。



非结构化网格的划分方法大体上可以分为 3 类：第一类是八叉树（Octree）方法，第二类是 Delaunay 方法，第三类是锋面推进（Advancing Front）法。

八叉树方法于 20 世纪 80 年代由 Mark Shephard 首创，是一种先用六面体网格剖分流场，再在六面体内部增加节点，将原有网格单元剖分为更小的单元，直到满足网格精度的方法。在二维情况下，其初始网格为四边形网格，相应的网格划分方法称为四叉树（Quadtree）方法。

Delaunay 方法指的是一大类方法，这些方法的共同特点是在网格剖分的过程中满足 Delaunay 准则。Delaunay 准则又称空心球（Empty Sphere）准则，其含义是过三角形 3 个顶点的圆或过四面体 4 个顶点的球的内部不能包含其他网格单元的节点。当然，这里的“其他网格的节点”不包括与当前网格单元共用的那些节点。Delaunay 方法在具体划分网格时可以先将流场划分为粗大的网格，然后通过向初始网格内部插入新的网格节点的方式逐渐使之细化，直到网格密度满足密度函数的要求，或者网格尺度满足尺度函数的要求为止；也可以先划分边界网格，再从边界网格根据 Delaunay 准则向流场内部推进（类似于后面的锋面推进法）；还可以先根据 Delaunay 准则生成内部网格，再根据边界网格的约束条件对网格进行修正，以得到最终计算所需的网格。

锋面推进法是由美国 George Mason 大学的 Rainald Lohner 和中国香港大学的 S.H. Lo 发展起来的。锋面推进法在网格划分的过程中，首先要在边界上划分好三角形单元，然后再根据边界上的三角形的 3 个顶点计算、确定第 4 个顶点，最终构成新的四面体。整个网格的划分过程是从边界向流场内部推进的，推进过程中存在一个“锋面”，直到从各个边界上的锋面相遇并融合，网格划分过程才结束。在锋面推进过程中，基于原有三角形边界面得到的第 4 个顶点，可以是新生成的顶点，也可以是流场中原来存在的节点。究竟采用原有节点，还是需要新生成一个节点，都取决于对网格划分进行控制的尺度函数。在网格推进的过程中，除了要生成、确定第 4 顶点外，还要判断来自各个边界的锋面是否发生冲突和重叠，最后得到满足网格密度或尺度要求的网格。

无论何种网格划分方法，其网格密度通常都依赖于流场的结构。在流场变量变化梯度较大的地方，如边界层内部、激波附近区域或分离线附近，需要较大的网格密度，而在流场变量较平缓的区域，则可以适当减小网格密度，以节省计算机资源。

网格在根据几何方法生成后，还必须进行光顺处理，即对畸变率较大的网格进行重新划分或调整。在实际的网格生成过程中，一方面可以通过网格的长宽比确定网格的畸变率，另一方面还可以通过控制每个网格节点夹角的方式控制畸变率。

畸变率对于计算结果的影响也与畸变网格所处的位置有关。如果畸变较大的网格处于流场变量梯度较大的区域，则由畸变带来的误差就比较大，对计算结果的影响也比较严重。如果畸变较大的网格位于流场变量变化平缓的区域，则带来的误差及其影响相对而言就比较小。因此，能否正确地划分网格在很大程度上依赖于对流场流动机理的把握和对流场结构的预判。

1.8.3 混合网格

混合网格是结构化网格与非结构化网格的组合，它继承了两种网格的优点，也弥补了两者的缺点，近期发展较快。如图 1-9 所示，该混合网格的具体生成方法为：在近壁面区域采用结构化网格，其他区域采用非结构化网格，Hypermesh 软件的 CFD 网格模块就可以生成这种网格。

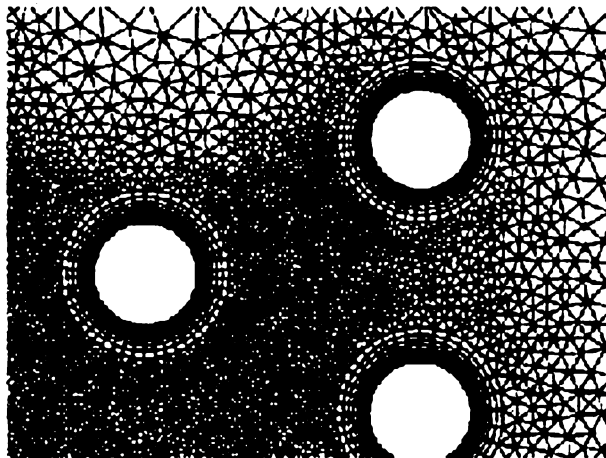


图 1-9　混合网格

1.8.4 网格质量

网格质量与具体问题的几何特性、流动特性及流场求解算法有关。网格质量影响单元间的通量计算，因此直接影响计算精度和收敛的难易程度。网格质量的考核指标包括节点分布、光滑性及单元的形状等。

（1）节点分布特性

连续性区域被离散化，使流动的特征解（剪切层、分离区域、激波、边界层和混合区域）与网格上节点的密度和分布直接相关。如边界层内的节点分布对边界层解（即网格近壁面间距）影响较大，这对计算壁面剪切应力和热传导系数的精度有重要意义。由于平均流动和湍流的强烈作用，湍流的数值计算结果往往比层流更容易受到网格的影响，因此网格的分辨率对于湍流计算也很重要。在近壁面区域，不同的近壁面模型需要不同的网格分辨率。

（2）光滑性

临近单元体积的快速变化会导致大的截断误差。截断误差是指控制方程偏导数和离散估计之间的差值。FLUENT 可以改变单元体积或网格体积梯度来精化网格，提供网格的光滑性。

（3）网格的形状

网格的形状（包括网格的扭曲度、网格的长细比和相邻网格的面积比或体积比）对数值解的精度有明显的影响。网格的扭曲度是指该网格和具有同等体积的等边网格外形之间的差别，一般要求不大于 1，扭曲度太大会降低解的精度和稳定性。网格的长细比表示网格拉伸

的度量，一般要求不大于 5:1（边界层允许使用更大长细比的网格，一般不宜大于 100:1）。对计算网格最基本的要求当然是所有网格点的 Jacobian 必须为正值，即网格体积必须为正，其他一些最常用的网格质量度量参数包括扭角（Skew Angle）、纵横比（Aspect Ratio）和弧长（Arc Length）等。



（4）流动流场相关性

分辨率、光滑性、单元的形状对于解的精度和稳定性的影响强烈依赖于所模拟的流场。比如，在流动开始的区域可以有过渡歪斜的网格，但在具有大流动梯度的区域内，过渡歪斜的网格可能会使整个计算精度降低或是失败。由于大梯度区域流动情况较复杂，需要尽量保证整个流场内网格的高质量和局部位置的网格数量（局部加密），即要求密度高、光滑性好、单元歪斜小。

第 2 章　ANSYS CFD 13.0 基础知识

本章主要内容：

本章主要介绍 FLUENT、CFX、ICEM-CFD 等软件的基础知识，以及与软件相关的前处理软件、计算求解设置、求解技巧、后处理、报告以及用户自定义函数（UDF）。

本章学习目标：

- ✧ ANSYS CFD 13.0 软件功能简介及安装方法。
- ✧ 计算设置流程及求解技巧。
- ✧ CFD-Post 与计算结果后处理。
- ✧ FLUENT/CFX 软件在 Workbench 环境中的应用。
- ✧ 用户自定义函数。
- ✧ ICEM CFD 和 GAMBIT 等网格前处理软件的基本功能。

2.1　ANSYS CFD 13.0 软件概述

鉴于 ANSYS 公司目前的发展方向是将旗下各流体力学求解软件归一化发展，本书将 ANSYS 13.0 版本中的 FLUENT、CFX、ICEM CFD 等软件统称为 ANSYS CFD 13.0 软件。

2.1.1　ANSYS FLUENT/CFX 13.0 的新功能

蕴含了一系列最新和最先进功能的 ANSYS 13.0，凭借其高可信度的仿真结果，帮助客户更快速、便捷和低成本地开发新产品。新版本在以下三大领域体现了全新的价值：

- ✧ 更高的精度和保真度：由于工程要求和设计复杂性的增加，仿真软件必须提供更精确的结果，能够真实反映随时间变化的运行条件。
- ✧ 更高的生产力：ANSYS 13.0 版本包含的几十种功能特性，最大限度地减少了产品开发团队在仿真过程中所需投入的时间和精力。
- ✧ 更强的计算能力：ANSYS 13.0 解决一些工程仿真问题的速度是先前版本的 5～10 倍。即使是复杂的多物理场仿真，也能更迅速和有效地完成，加快产品开发和市场投放。

基于 ANSYS 先前的版本，ANSYS 13.0 继续发展智能工程仿真技术，引领产品开发迈向新的阶段。通过压缩设计周期，优化产品多物理场性能，最大限度提高了仿真模型精度和自动化仿真过程的效率。ANSYS CFD 令创新性产品的问市更快速和便捷。图 2-1 所示为 ANSYS 软件的启动界面。



图 2-1　ANSYS 软件的启动界面

（1）湍流模型

ANSYS 13.0 增加了多种新的改进湍流模型，能够更精确地捕捉物理现象。

- ✧ 嵌入式大涡模拟功能允许在部分流体域使用大涡模拟，而其他部分使用雷诺平均的湍流模型。因为大涡模拟消耗资源大，而基于雷诺平均的湍流模型计算快速。这两种技术的融合，可只在关心的局部区域使用大涡模拟，在保证计算速度的前提下提高计算精度。
- ✧ 在 ANSYS FLUENT 中增加了适用于多相流的 k-omega 模型。这项功能扩展了两方程湍流模型的应用范围。
- ✧ ANSYS FLUENT 增加了自适应尺度湍流模型（SAS），这是一种非稳态的雷诺平均方法，能快速精确地模拟分离流动现象。
- ✧ ANSYS CFX 中一个关键的附加湍流模型是有边界的中心差分离散格式（BCD），可以避免非物理的振荡。这种振荡在诸如 LES/DES/SAS 等尺度解析时有时会出现。

（2）网格替换和重划分

这个功能可提高网格质量，提升计算精度。

- ✧ 关键帧的网格替换技术允许在一系列预先划分好的网格上求解。在每个替换步，当前的求解结果插值到新的网格上。要替换的网格必须是相同的拓扑域，网格在替换时可以光顺。可以用动网格事件来定义网格替换的时间和文件名。ANSYS FLUENT 中的关键帧网格替换技术是瞬态动网格求解时的内嵌选项。
- ✧ ANSYS 13.0 中新增的直角笛卡儿网格重划分功能可以增加精度。直角笛卡儿网格重划分功能在重划分整个区域时不考虑相邻区域的一致性连接关系。允许不借助前处理，能方便地从四面体网格替换到直角笛卡儿网格。

（3）多相流

ANSYS 13.0 增加了一些多相流模型，能满足用户更多的需求，并提供了更高的可信度和精度。

- ✧ 新的欧拉成核沸腾模型可以模拟壁面的过冷沸腾，包括非平衡过冷沸腾和过热蒸发。
- ✧ 增加了可压缩的离散格式，可更快速地进行瞬态分析，其结果和标准的 VOF 格式类似。

✧ 对拉格朗日多相流，DDPM 模型中增加了堆积极限选项，避免出现超过极限的堆积。这个选项可以模拟悬浮、流化床，也可以模拟多尺度颗粒系统。

✧ ANSYS FLUENT 软件中的喷雾破碎模型中增加了 Kelvin–Helmholt-Rayleigh–Taylor（KHRT）破碎模型。这是一种高韦伯数下模拟一次破碎和二次破碎的高级模型。

✧ 新的耦合多级方法是可替代 VOF 方法模拟界面的技术，它在计算梯度和曲率方面有改进，并且能更好地预测界面张力。

（4）固体运动和固体温度

ANSYS 13.0 增加了几种提高可信度和精度的方法。

✧ 在 ANSYS FLUENT 中，参考坐标系和动网格方法是相互独立的，可以同时设置。这样，可以在一个运动坐标系（MRF）中设置另一个 MRF。这样的例子包括转动的风扇同时带有振动；转弯的汽车同时带有轮子转动。

✧ 在 ANSYS CFX 中，多孔介质 CHT 域可以分别模拟流体和固体的温度。用户在设置流体和固体间的换热系数时，同时设置界面面密度。能量可以在固体域和流体域间传递。

（5）优化设计

参数化研究能帮助公司设计出更好的产品，或对产品性能有更深入的理解。在 ANSYS FLUENT 求解器中集成了流体动力学的自动形状优化，使用梯度信息、网格变形技术和优化算法。例如，指定一个管道出口的流速达到最均匀，管道形状就可以自动确定。原始的设计采用直边，出口流动不均匀，ANSYS FLUENT 自动形状优化技术可以给出曲线的形状，以得到更均匀的出口速度分布，如图 2−2 所示。

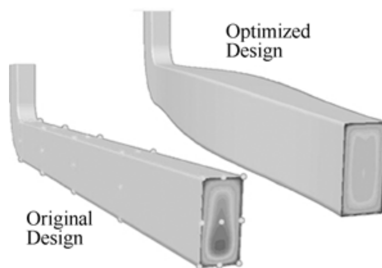


图 2−2　自动形状优化

2.1.2 FLUENT 软件

FLUENT 软件是国内外最流行的 CFD 软件，其丰富的物理模型、先进的数值计算方法和强大的后处理功能赢得了庞大的使用者队伍。自 1983 年问世以来，FLUENT 就一直是 CFD 软件技术的领跑者，广泛应用于航空航天、旋转机械、高速列车、汽车、能源、石油化工和冶金等领域。从 2006 年 5 月开始，ANSYS 公司将 FLUENT 纳入 ANSYS Workbench 环境中，并加大对 FLUENT 核心 CFD 技术的投资，确保了 FLUENT 在 CFD 领域的领先地位。

作为一款通用的 CFD 软件，FLUENT 软件采用基于完全非结构化网格的有限体积法，包含基于压力的分离求解器、基于压力的耦合求解器、基于密度的隐式求解器、基于密度的显式求解器，可用于模拟从不可压缩（如汽车行业等）到高超音速（如航空航天行业等）范围内的各种复杂流场。

1. FLUENT 可以计算的流动类型

FLUENT 可以计算的流动类型主要包括：

1）任意复杂外形的二维/三维流动。

2）牛顿/非牛顿流体流动。

3）无黏流/层流/湍流流动。

4）可压/不可压流动。

5）定常/非定常流动。



6）自然对流传热和强迫对流传热。

7）热传导和对流传热相耦合的传热计算。

8）辐射传热计算。

9）惯性（静止）坐标、非惯性（旋转）坐标下的流场计算。

10）动网格计算。

11）化学组分传输与气体燃烧。

12）颗粒、水滴、气泡等弥散相的轨迹计算。

13）多孔介质流动计算。

14）风扇、换热器性能的一维模型计算。

15）两相流计算。

16）源项体积任意变化的计算，源项类型包括热源、质量源、动量源、湍流源和化学组分源项等。

17）复杂表面问题中带自由流动的计算。

2. 基本物理模型

FLUENT 提供了从不可压到可压、层流、湍流等大范围的模拟能力。在 FLUENT 中，输运现象的数学模型与所模拟的几何图形的复杂情况紧密结合。FLUENT 应用的例子包括层流非牛顿流的模拟，涡轮机和汽车发动机的湍流热传导，锅炉内煤炭粉碎机的燃烧，可压射流，空气动力外流，以及固体火箭发动机的可压化学反应流。

为了与工业应用相结合，FLUENT 提供了很多有用的功能，如多孔介质，块参数（风扇和热交换），周期性流动和热传导，涡流，以及移动坐标系模型。移动参考系模型可以模拟单一或多个参考系。FLUENT 还提供了时间精度滑动网格方法以及计算时间平均流动流场的混合平面模型。滑动网格方法在模拟涡轮机多重过程中很有用。FLUENT 中另一个很有用的模型是离散相模型，这个模型可以用于分析喷雾和粒子流。多相流模型可以用于预测射流的破散以及大坝塌陷之后流体的运动、气穴现象、沉淀和分离。

湍流模型是 FLUENT 中很重要的一部分。湍流会影响到其他的物理现象，如浮力和可压缩性等。湍流模型提供了很大的应用范围，而不需要对特定的应用做出适当的调节，而且它涵括了浮力和可压缩性等其他物理现象的影响。通过使用扩展壁面函数和区域模型，还可以保证近壁面区域的求解精度。

FLUENT 可以模拟各种热传导模式，包括具有或不具有其他复杂性变化，如热传导的、多孔介质的、自然的、受迫的以及混合的对流。模拟相应介质的辐射模型及子模型的设定通常可以将燃烧的复杂性考虑进来。FLUENT 的一个最强大的功能就是它可以通过耗散模型或概率密度函数模型来模拟燃烧现象。对燃烧应用十分有用的其他模型也可以在 FLUENT 中使用，其中包括碳和液滴的燃烧以及污染形成模型。

2.1.3 CFX 软件

CFX 是全球第一个通过 ISO9001 质量认证的大型商业 CFD 软件，是英国 AEA Technology 公司为解决其在科技咨询服务中遇到的工业实际问题而开发的，诞生在工业应用背景中的 CFX 一直将精确的计算结果、丰富的物理模型、强大的用户扩展性作为其发展的基本要求，并以其在这些方面的卓越成就，引领着 CFD 技术的不断发展。目前，CFX 已经遍及航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、火灾安全、冶金和环保等领域，为其在全球 6000 多个用户解决了大量的实际问题。

CFX 是全球第一个在复杂几何、网格和求解这 3 个 CFD 传统瓶颈问题上均获得重大突破的商业 CFD 软件，其特点如下：

（1）精确的数值方法

采用基于有限元的有限体积法，在保证了有限体积法的守恒特性的基础上，吸收了有限元法的数值精确性。其开发者 Florian Menter 等人提出的 SST 湍流模型的优异性目前已得到业界广泛认同。

（2）快速稳健的求解技术

CFX 是全球第一个发展和使用全隐式多网格耦合求解技术的商业化软件，克服了传统算法需要“假设压力项——求解——修正压力项”的反复迭代过程，而同时求解动量方程和连续性方程。再加上其采用的自适应多网格技术，计算速度和稳定性较传统方法提高了至少一个数量级，使得工程技术人员开始敢于计算大型工程的真实流动问题。CFX 具有突出的并行功能，可以在混合网络上的 UNIX、Linux 和 Windows 平台之间随意并行，收敛速度不受并行计算的 CPU 数目影响。

（3）丰富的物理模型

CFX 的物理模型建立在世界上最大的科技工程企业 AEA Technology 50 余年科技工程实践经验基础之上。经过近 30 年的发展，CFX 拥有包括流体流动、传热、辐射、多相流、化学反应和燃烧等问题的丰富的通用物理模型，以及气蚀、凝固、沸腾和多孔介质等大量复杂现象的实用模型。

（4）领先的流固耦合技术

CFX 借助于 ANSYS 在多物理场方面深厚的技术基础，推出了目前世界上最优秀的流固耦合（FSI）技术。FSI 技术广泛应用于生物医学、航空航天和土木工程等行业。

（5）集成环境与优化技术

ANSYS Workbench 为 CFX 提供了从分析开始到结束的统一环境，大大提高了使用者的工作效率。

2.2 ANSYS 13.0 软件的安装方法

本节以 64 位机为例，讲解 ANSYS 13.0 的安装方法。

1）首先解压 MAGNITUDE.RAR，生成 MAGNITUDE 文件夹，然后双击 MAGNITUDE 文件夹中的文件“AP13_Calc.exe”，输入字母“y”后按〈Enter〉键，MAGNITUDE 文件夹

中自动生成 license.txt 文件，如图 2-3 所示。

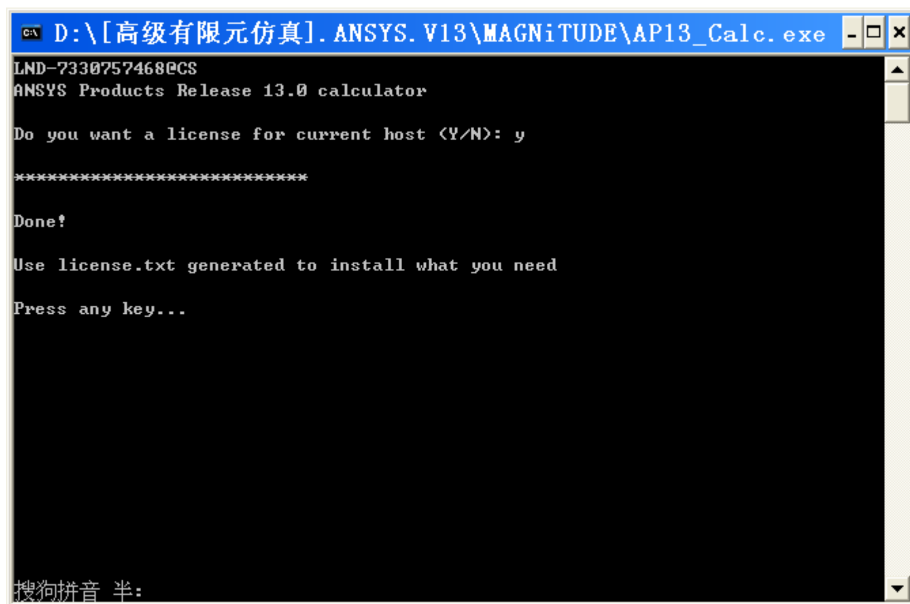


图 2-3　生成 license.txt 文件

2）按任意键退出该对话框。打开 license.txt 文件，如图 2-4 所示。



SERVER SJC-KFB-120 1cc1de5d493f 1055VENDOR ansyslmdUSE_SERVERINCREMENT
1spacdes ansyslmd 2010.0920 31-dec-2020 2 01613958CB3C \
VENDOR_STRING=customer:00283668 \
vendor_info=af1a83b49b5e8a9e5f3d9fff6b6991da0e810734 \ ISSUER=LND ISSUED=20-Nov-2010
ck=18 SN=7330757468@CS \ START=20-Nov-2010INCREMENT a_jt_reader ansyslmd 2010.0920
31-dec-2020 2 2A452F2A151F \ VENDOR_STRING=customer:00283668 \
vendor_info=6d62673427e06eb2d5e4bb06a855ffb21357957a \ ISSUER=LND ISSUED=20-Nov-2010
ck=52 SN=7330757468@CS \ START=20-Nov-2010INCREMENT a_proe_reader ansyslmd
2010.0920 31-dec-2020 2 064D72740331 \ VENDOR_STRING=customer:00283668 \
vendor_info=514fa43abb9aefce994ea98813a89f6c4971f4be \ ISSUER=LND ISSUED=20-Nov-2010
ck=59 SN=7330757468@CS \ START=20-Nov-2010INCREMENT a_spaceclaim_catv5 ansyslmd
2010.0920 31-dec-2020 2 \ 305D26025996 VENDOR_STRING=customer:00283668 \
vendor_info=17d8ac9b804f75098bcbf2ac26051c368f296088 \ ISSUER=LND ISSUED=20-Nov-2010
ck=11 SN=7330757468@CS \ START=20-Nov-2010INCREMENT a_spaceclaim_dirmod ansyslmd
2010.0920 31-dec-2020 2 \ 22476B464413 VENDOR_STRING=customer:00283668 \
vendor_info=44ced359d5a74f22b5cd09ee6d854f9fce49fc0f \ ISSUER=LND ISSUED=20-Nov-2010
ck=4 SN=7330757468@CS \ START=20-Nov-2010INCREMENT acdi_ad2dfull ansyslmd 2010.0920
31-dec-2020 2 04581B295D9A \ VENDOR_STRING=customer:00283668 \
vendor_info=70b0ee9f1e12ff2eb8f769b14779b034515f4eb4 \ ISSUER=LND ISSUED=20-Nov-2010
ck=57 SN=7330757468@CS \ START=20-Nov-2010INCREMENT acdi_ad3dfull ansyslmd 2010.0920
31-dec-2020 2 841A2076990B \ VENDOR_STRING=customer:00283668 \
vendor_info=302eeb8d31fd91a90e4abc6d1c204379bb72d89b \ ISSUER=LND
ISSUED=20-Nov-2010 ck=236 SN=7330757468@CS \ START=20-Nov-2010INCREMENT

图 2-4　打开 license.txt 文件

3）使用 DAEMON Tools 加载 ISO 映像[高级有限元仿真].ANSYS.V13-MAGNiTUDE-DISK3.iso。当 DAEMON 加载后，会自动出现初始安装界面，如图 2-5 所示。

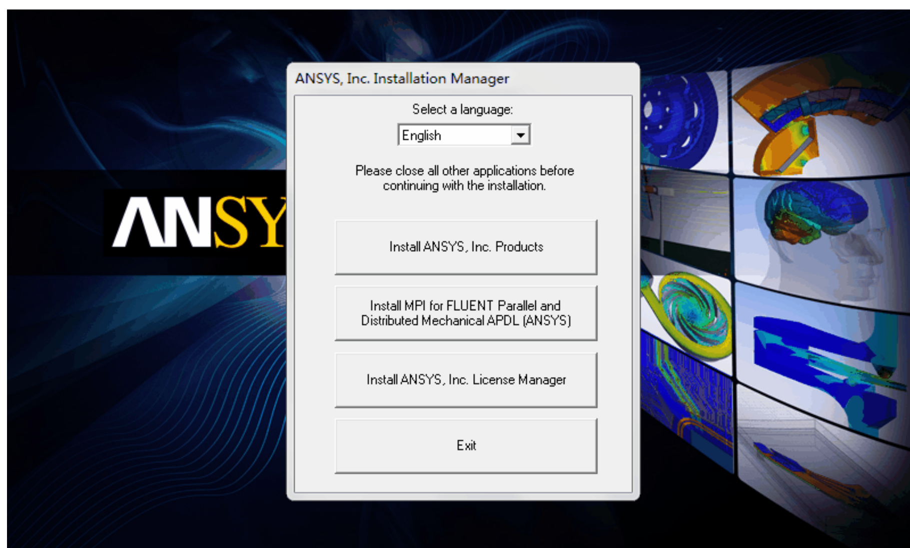


图 2-5　初始安装界面

4）选择 English，单击“Install ANSYS,Inc.Products”按钮，开始安装。

5）选择“I AGREE”选项，单击“Next>>”按钮进入下一个安装界面，如图 2-6 所示。



图 2-6　同意安装前的协议

6）如图 2-7 所示，设置安装目录，安装目录的容量一定要足够，整个软件包需要 12GB 的空间。如果 C 盘空间不够，可选择别的盘，然后单击“Next>>”按钮进入下一个安装界面。

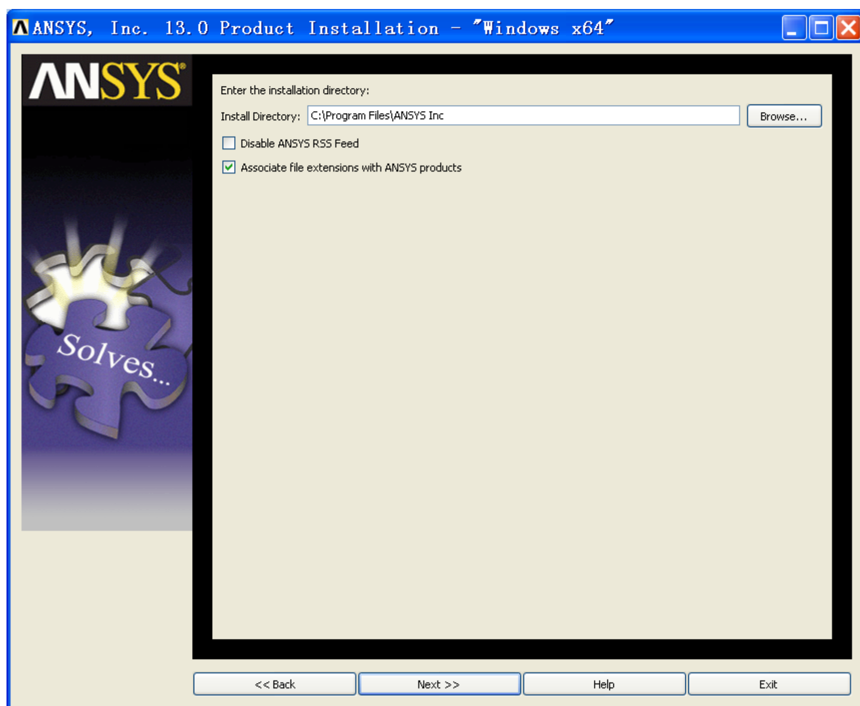


图 2-7 设置安装目录

如果磁盘空间不足，会出现如图 2-8 所示的提示信息，此时需要单击“Back”按钮返回，重新选择安装位置。

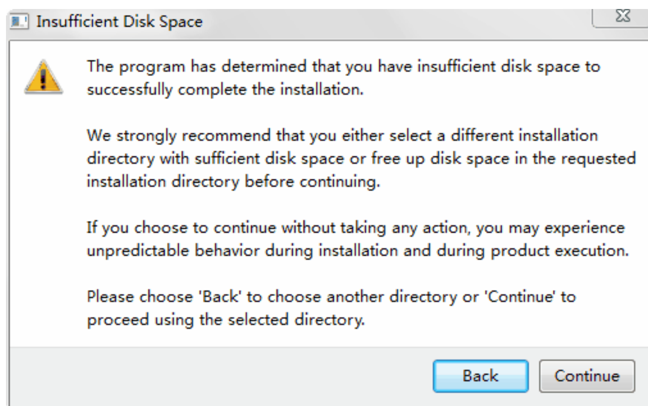


图 2-8 磁盘空间不足的提示信息

7）如图 2-9 所示，软件默认安装多个模块，总共需占用约 12GB 的空间。

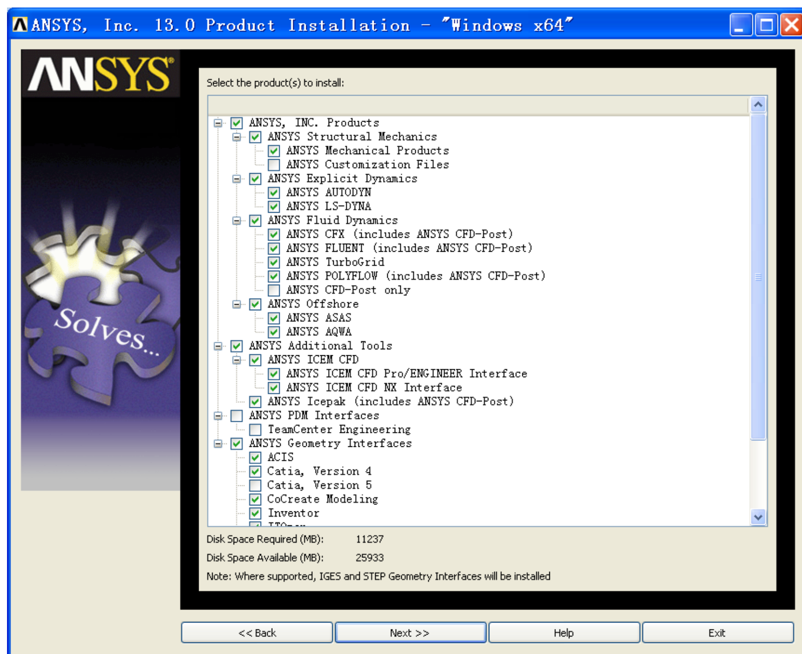


图 2-9　软件默认安装多个模块

8）用户可根据自己的需求，选择各个安装组件和模块，本书要求满足流体计算就行，故保留 CFX、Polyflow 等流体模块，而取消选择图 2-10 中的 3 个模块。可以看出，安装空间需求降低，然后单击“Next>>”按钮进入下一个安装界面。

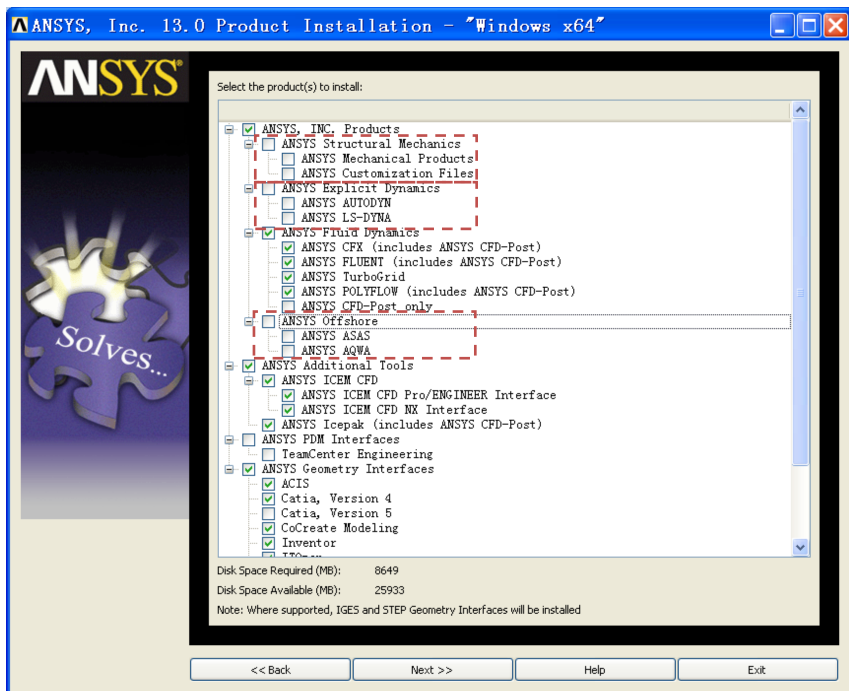


图 2-10　选择各个安装组件和模块

9）设置 Pro/E 和 ANSYS 的对接信息。没有安装 Pro/E 的这一步可跳过，选择“Skip this step for ICEM CFD and configure later”和“Skip this step for Workbench and configure later”两项即可，如图 2-11 所示。然后单击“Next>>”按钮进入下一个安装界面。

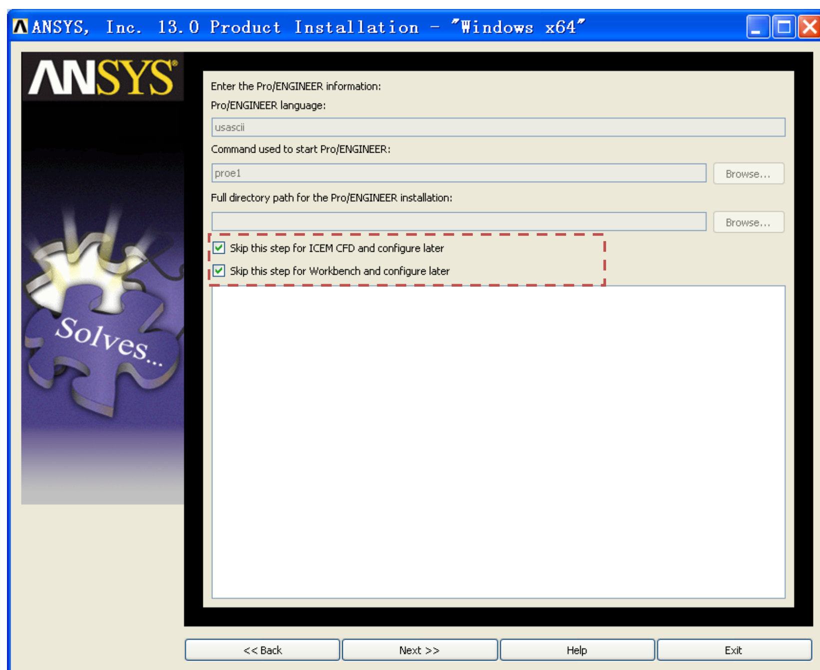


图 2-11　忽略 Pro/E 和 ANSYS 的对接信息

10）设置 ANSYS 与 UG 的对接信息，没有安装 UG 的这一步可跳过，选择“Skip this step for Workbench and configure later”和“Skip this step for ICEM CFD and configure later”两项即可，如图 2-12 所示。单击“Next>>”按钮进入下一个安装界面。

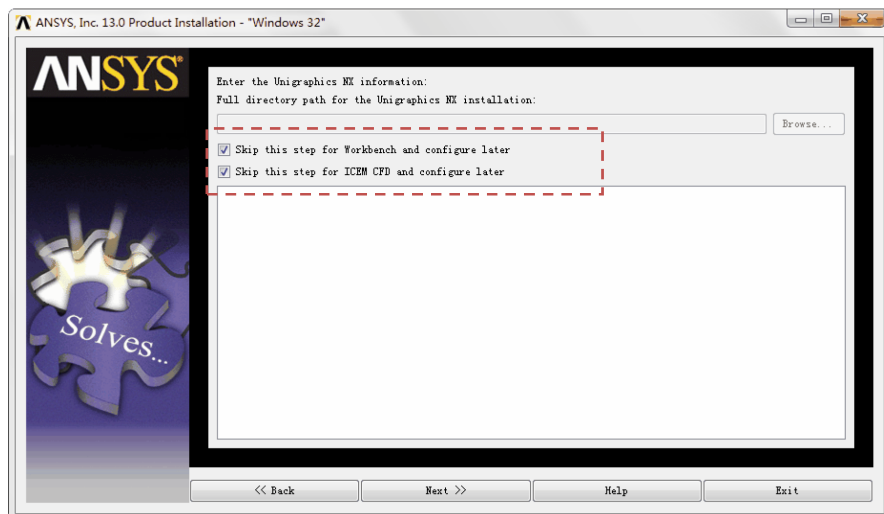


图 2-12　忽略 ANSYS 与 UG 的对接信息

11）ANSYS 验证 licensing 信息。如图 2-13 所示，检查完成后，单击“Next>>”按钮进入下一个安装界面。

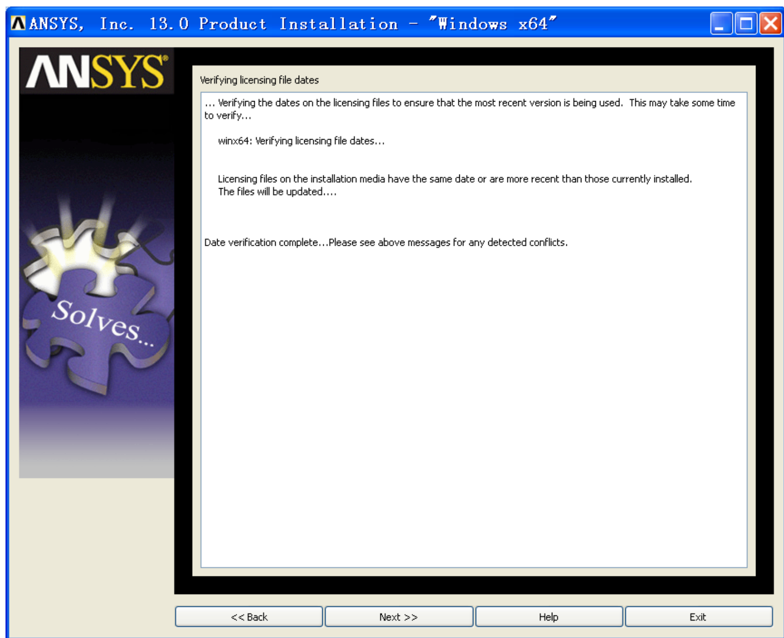


图 2-13　ANSYS 验证 licensing 信息

12）重新校对 ANSYS 的安装设置，如图 2-14 所示，单击“Next>>”按钮进入下一个安装界面。

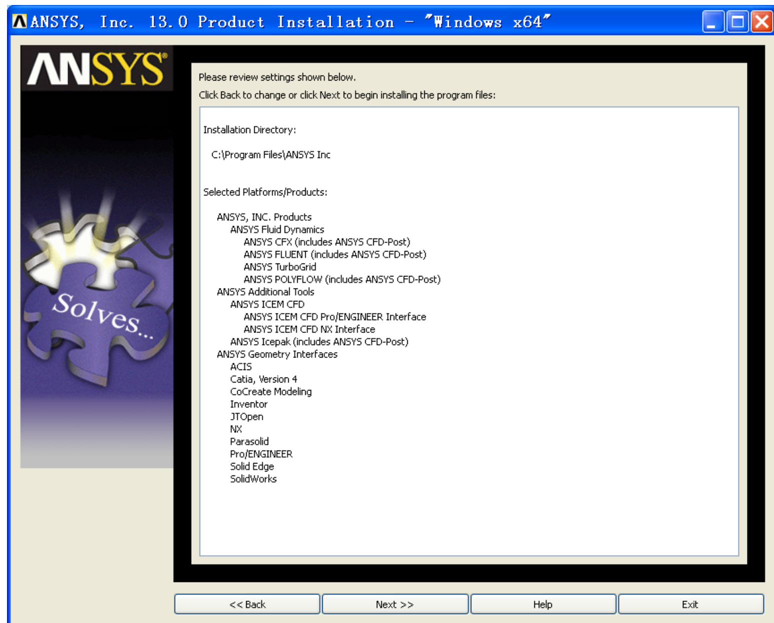


图 2-14　校对 ANSYS 的安装设置

13）然后进入安装过程，解压 47 个程序包（注意：因系统预装模块的情况各有不同，该数值会略微有所不同，下同），大约需要十多分钟时间，其中 Package6、19、32 会时间长一点，请耐心等待。安装过程中，安装界面会播放 1970、1975、1983、1987、1993、1996、2000、2003、2004、2006、2007、2008、2010 年的软件版本升级信息，如图 2-15 所示。



图 2-15　解压 47 个程序包

14）安装过程中，安装界面的命令流大致如图 2-16 和图 2-17 所示。

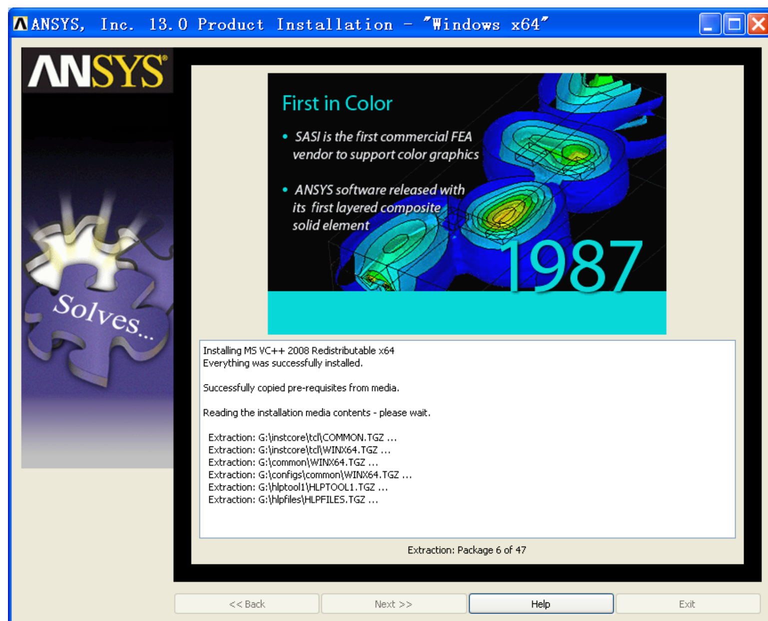


图 2-16　安装第 6 个程序包



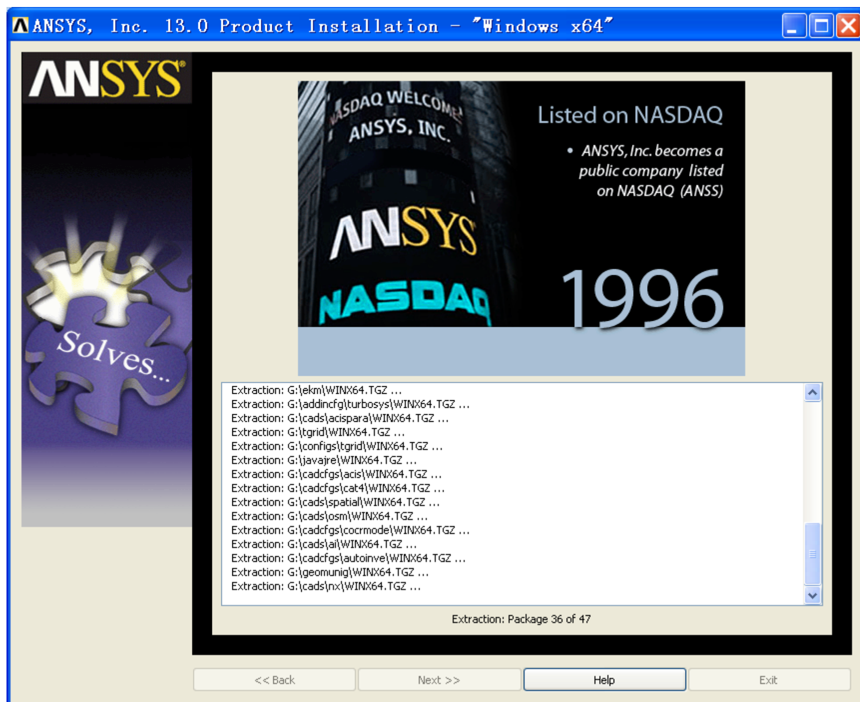


图 2-17　安装第 36 个程序包

15）安装过程中，会出现如图 2-18 所示的对话框，提示用户选择另一个安装光盘。

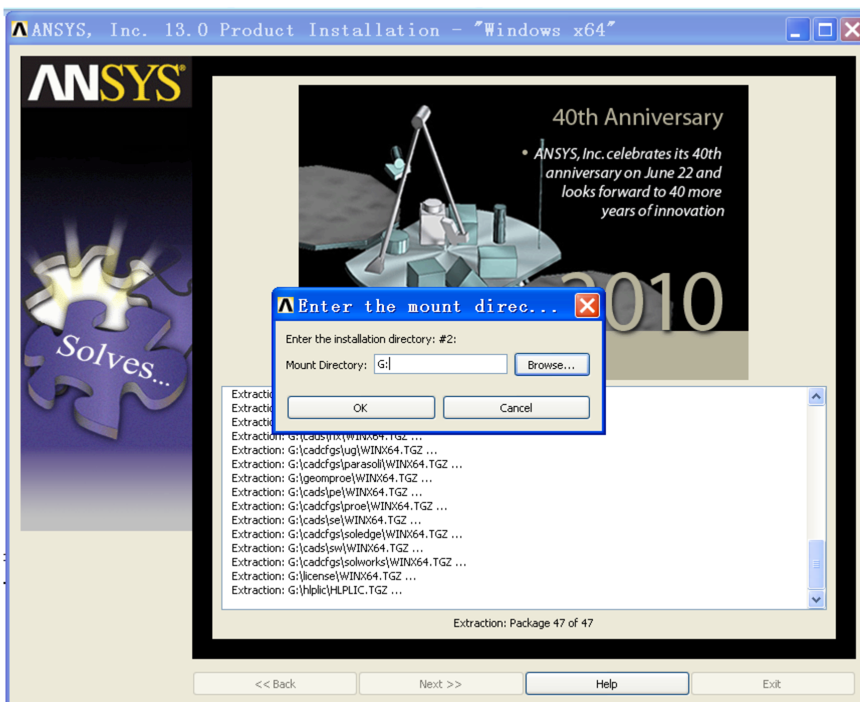


图 2-18　提示用户选择另一个安装光盘

16）用 DAEMON Tools Lite 加载[高级有限元仿真].ANSYS.V13.DISK4.REPACK-MAGNiTUDE.iso 镜像文件。加载完成后，单击“OK”按钮，进入 Extraction 1 of 35，解压 35 个程序包，如图 2-19 所示，这需要几分钟时间。



图 2-19　解压 35 个程序包

17）然后是自动配置产品程序包 Configuration: Product 2 of 13，也需要几分钟时间，如图 2-20 所示。

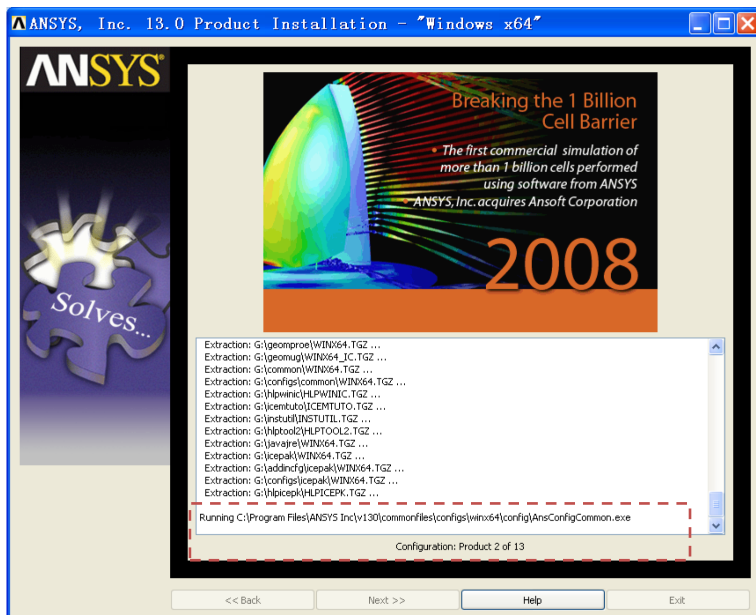


图 2-20　安装第 2 个程序包

18）检查 RSS，如图 2-21 所示，出现 RSS is enabled 信息后，单击“Next>>”按钮，进入下一个安装界面。

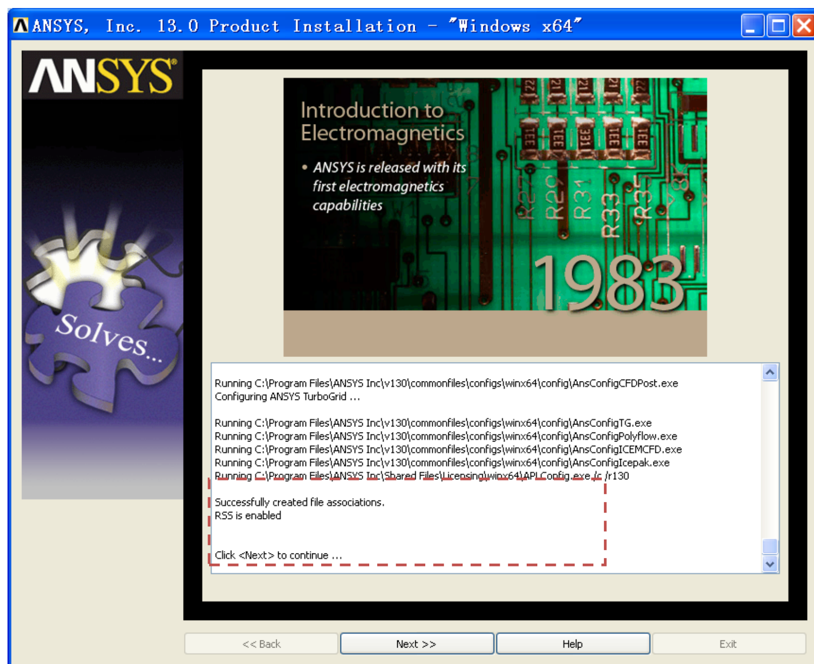


图 2-21 出现 RSS is enabled 信息

19）如图 2-22 所示，出现“Release 13.0 Licensing Client Installation Configuration”界面，进行 ANSYS 13.0 的释放许可证客户安装配置，自动检测完毕后出现“Specify the License Server Machine 确定许可证服务机”界面。注意：2325、1055、1-server 不要改动，只需要输入计算机的 Hostname 1 即可（必须是当前的计算机），如图 2-23 所示。

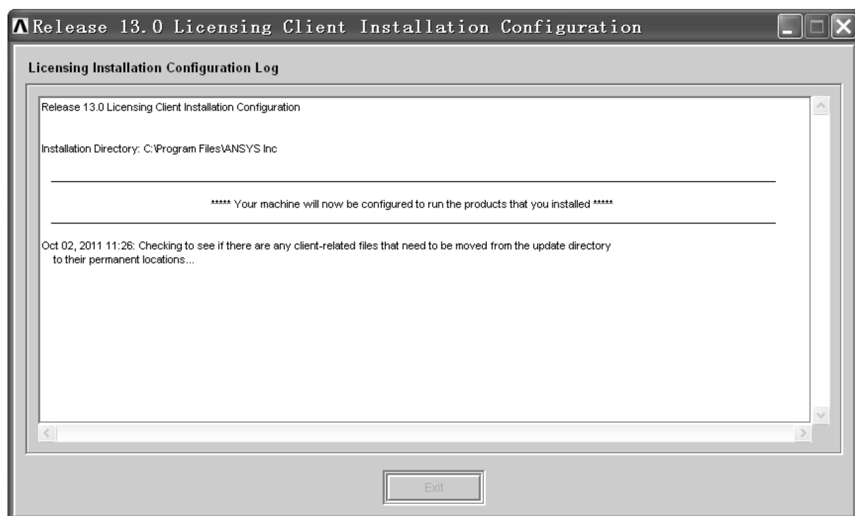


图 2-22 释放许可证客户安装配置

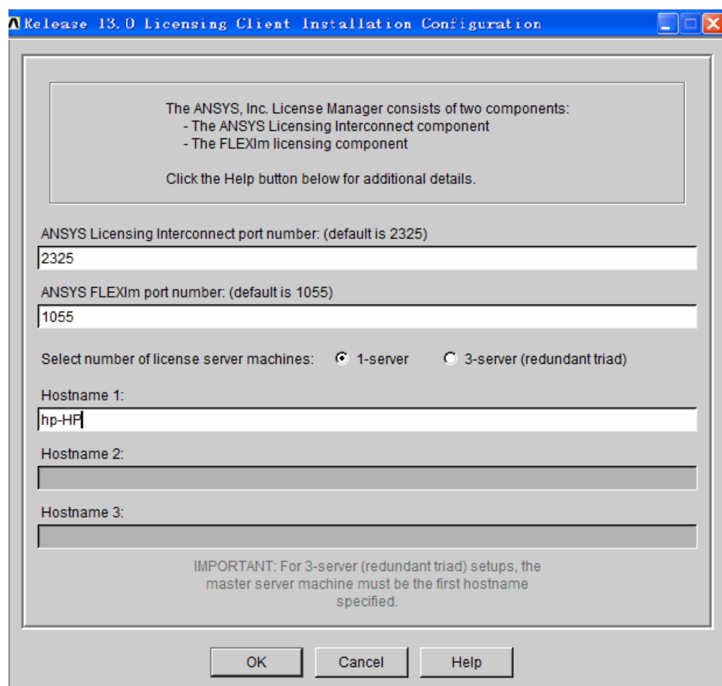


图 2-23 输入计算机的 Hostname

20）单击“OK”按钮，程序自动配置完成。程序配置完成的完整信息如图 2-24 所示。

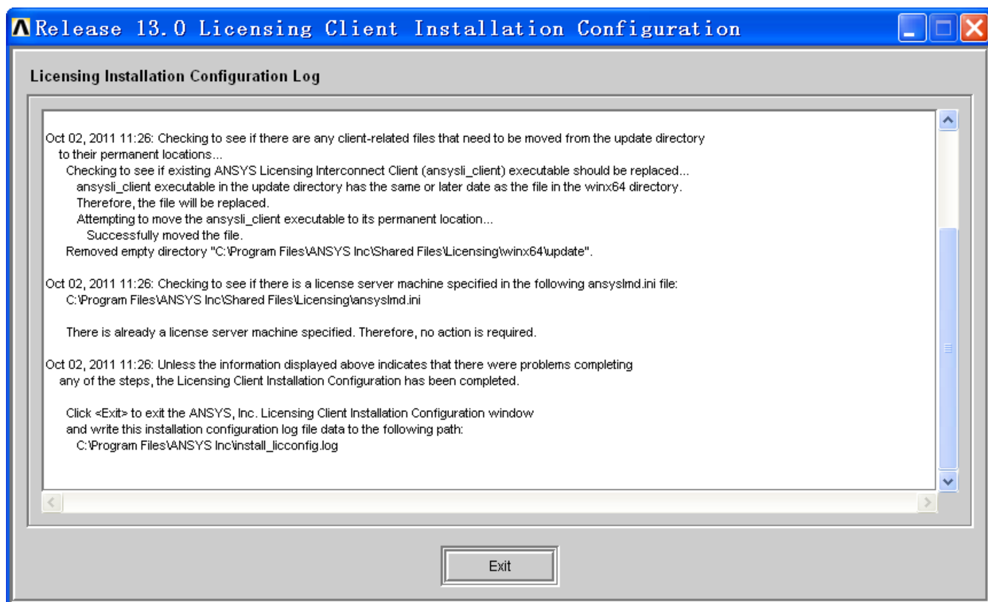


图 2-24 程序配置完成的完整信息

21）单击“Exit”按钮退出，完成了 ANSYS 主程序的安装。然后出现以下***IMPORTANT***界面，如图 2-25 所示。

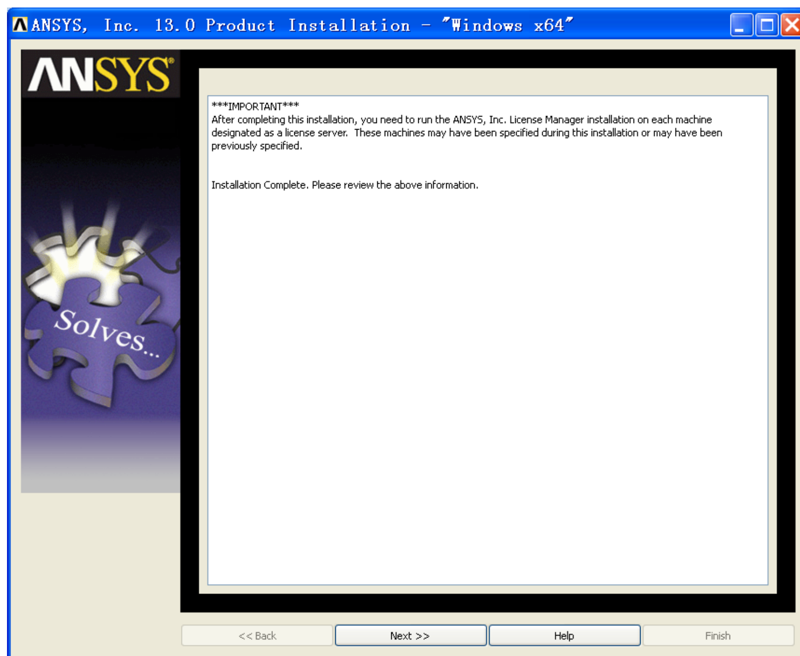


图 2-25　IMPORTANT 界面

22）继续单击“Next>>”按钮，出现 Survey 填写安装调查界面，如图 2-26 所示。如果不想填写该调查，可以直接单击“Finish”按钮完成安装。至此，ANSYS 主程序安装完毕。

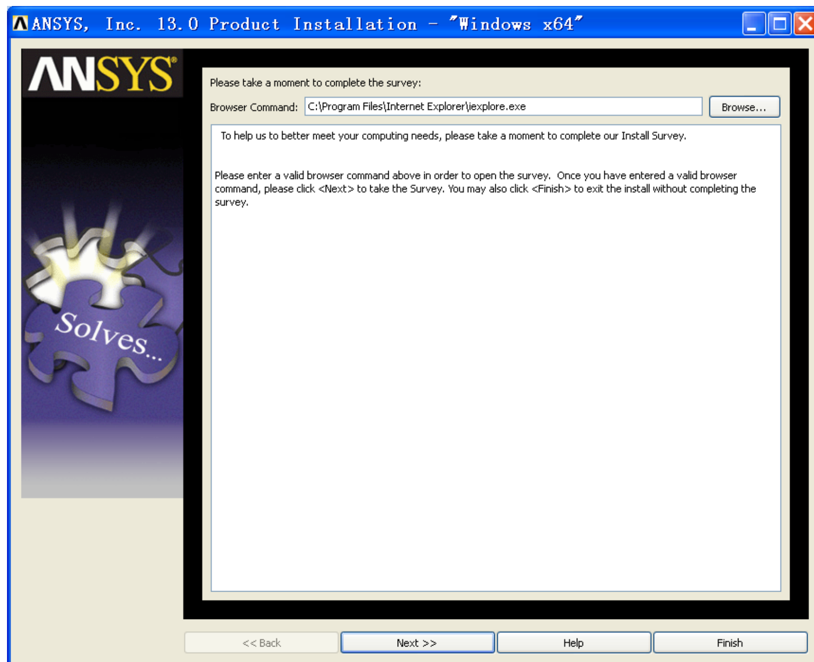


图 2-26　安装调查界面

23）回到初始安装界面，根据自己的需要可以选择安装 MPI，如图 2-27 所示。此处不再详述。

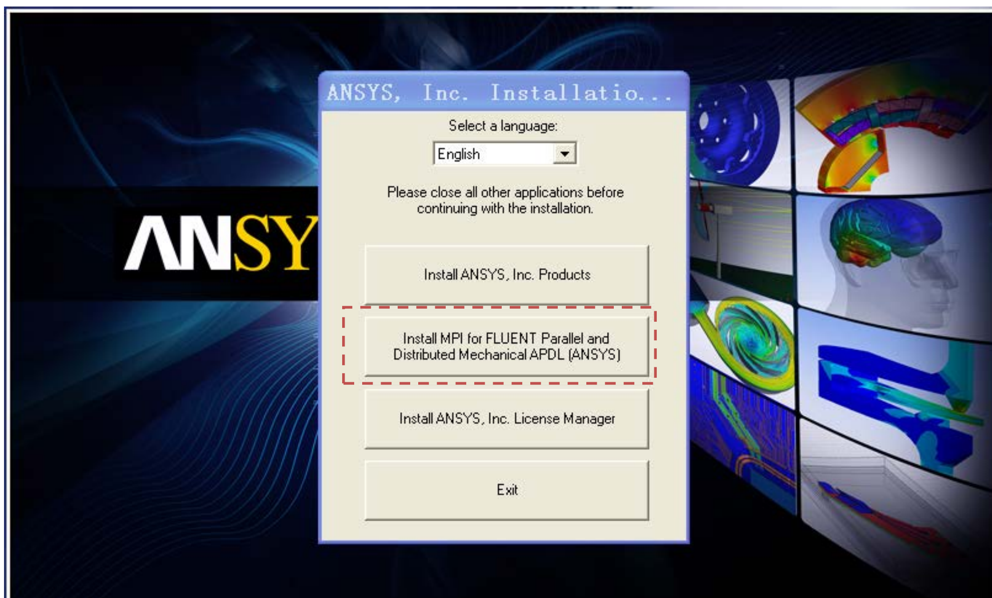


图 2-27　安装 MPI

24）单击如图 2-28 所示的模块，安装许可证管理器 License Manager。

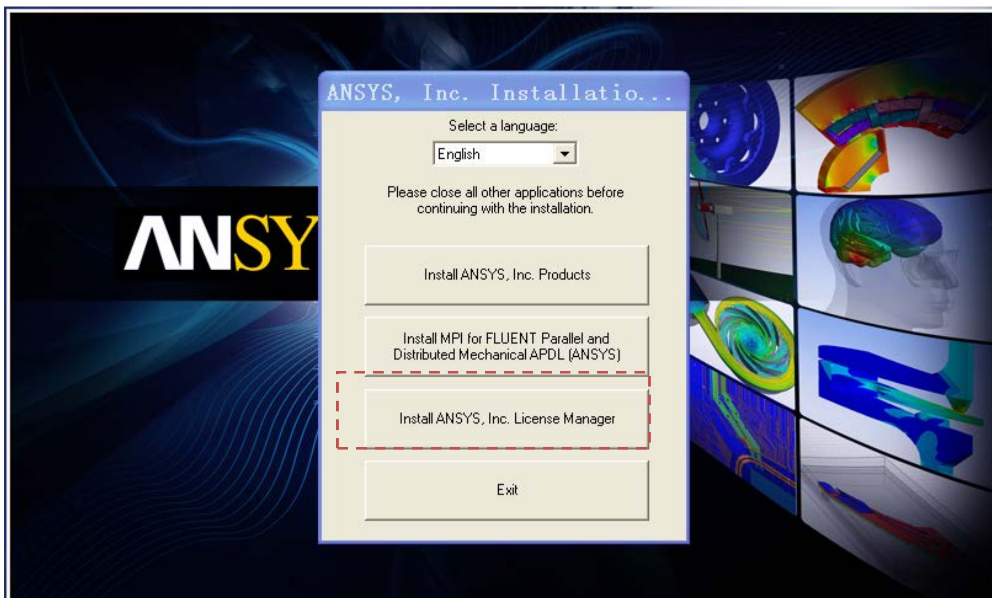


图 2-28　安装 License Manager

25）单击“OK”按钮，选择“I AGREE”单选按钮，依次单击“Next>>”按钮，如图 2-29～图 2-35 所示。

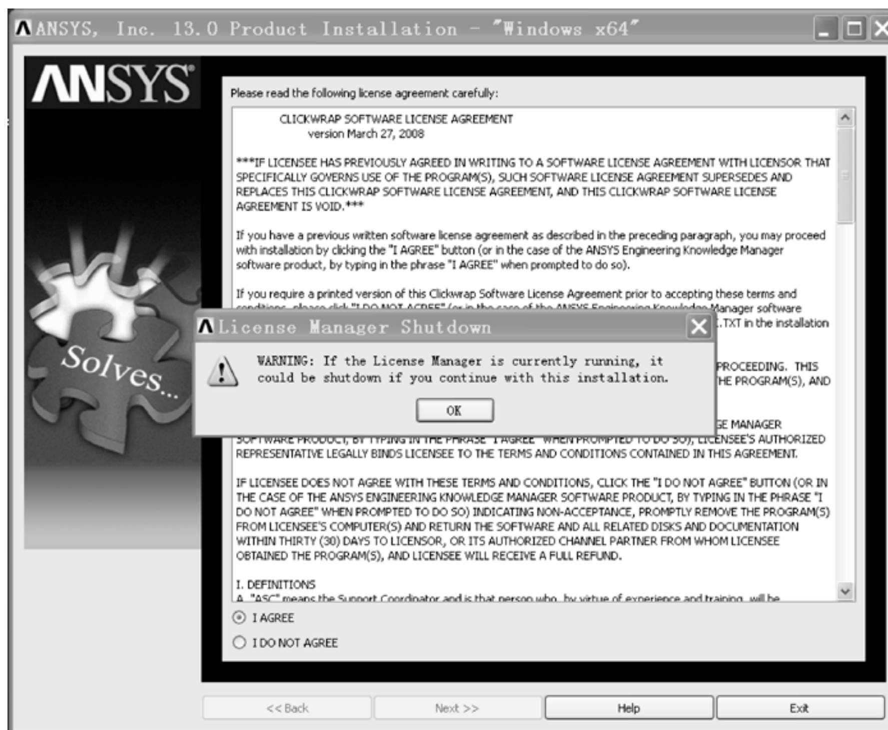


图 2-29　同意安装协议

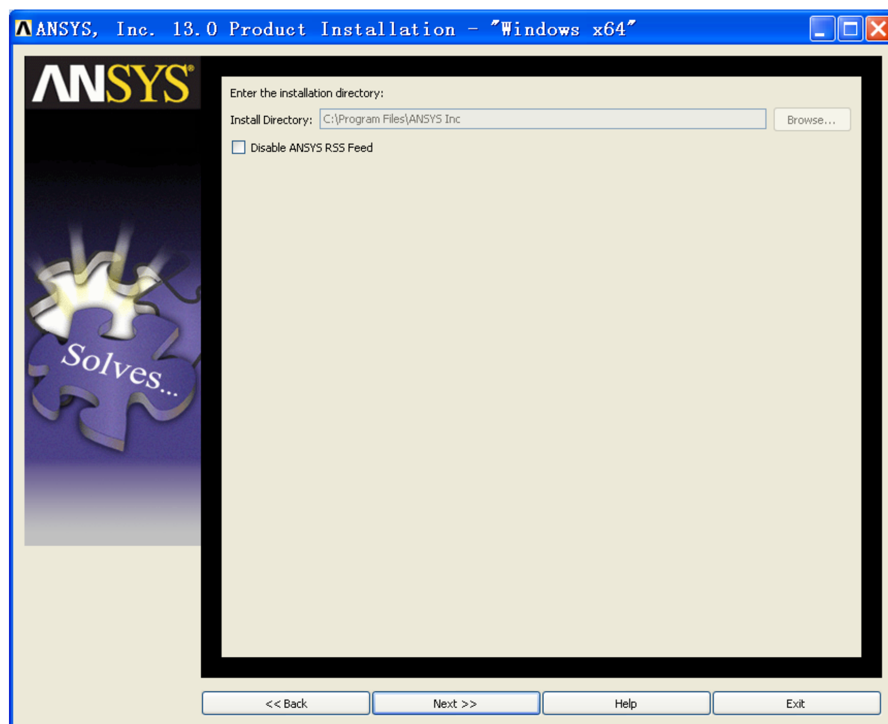


图 2-30　选择安装路径

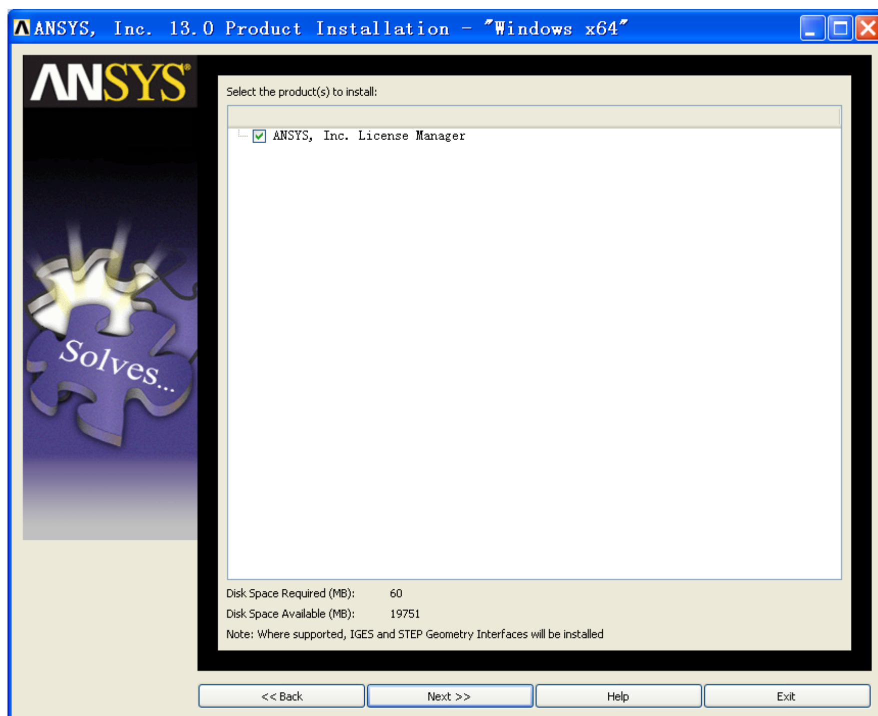


图 2-31 选择安装 License Manager

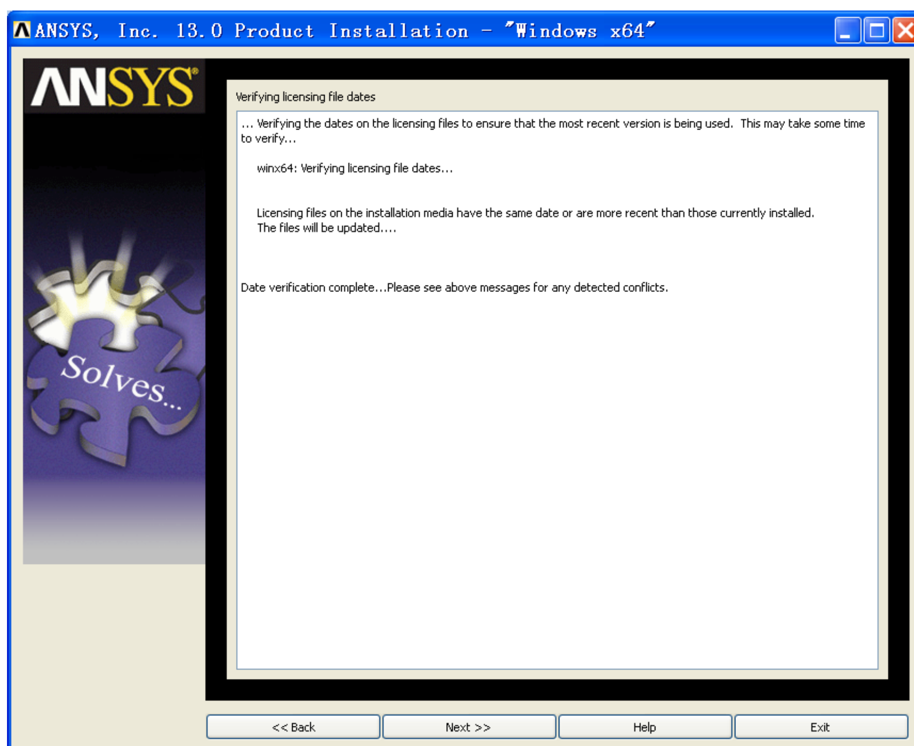


图 2-32 License Manager 信息校核

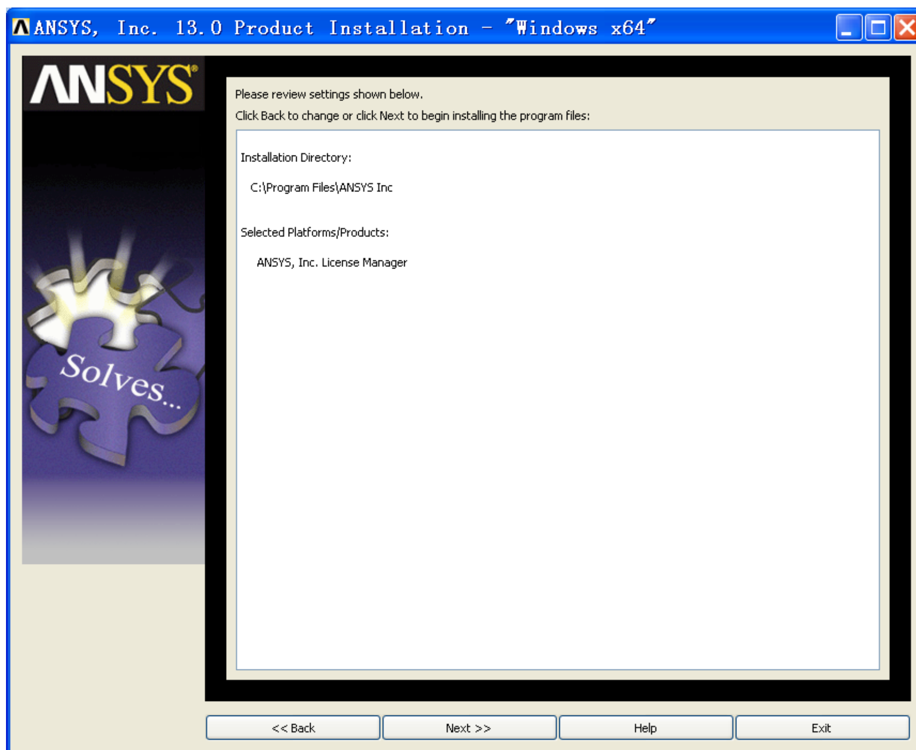


图 2-33　确认安装路径与文件信息



图 2-34　解压安装 5 个程序包

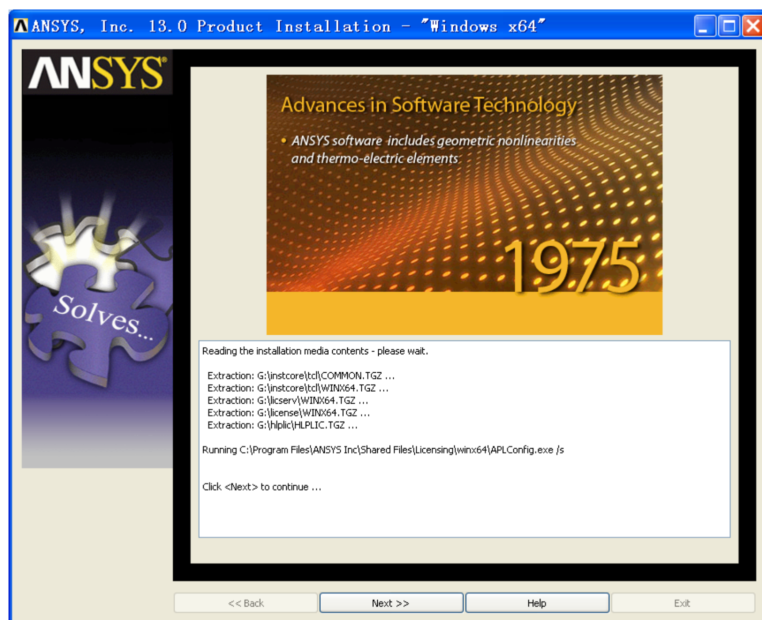


图 2-35 安装完毕

26）进入安装许可证服务器界面，如图 2-36 所示。

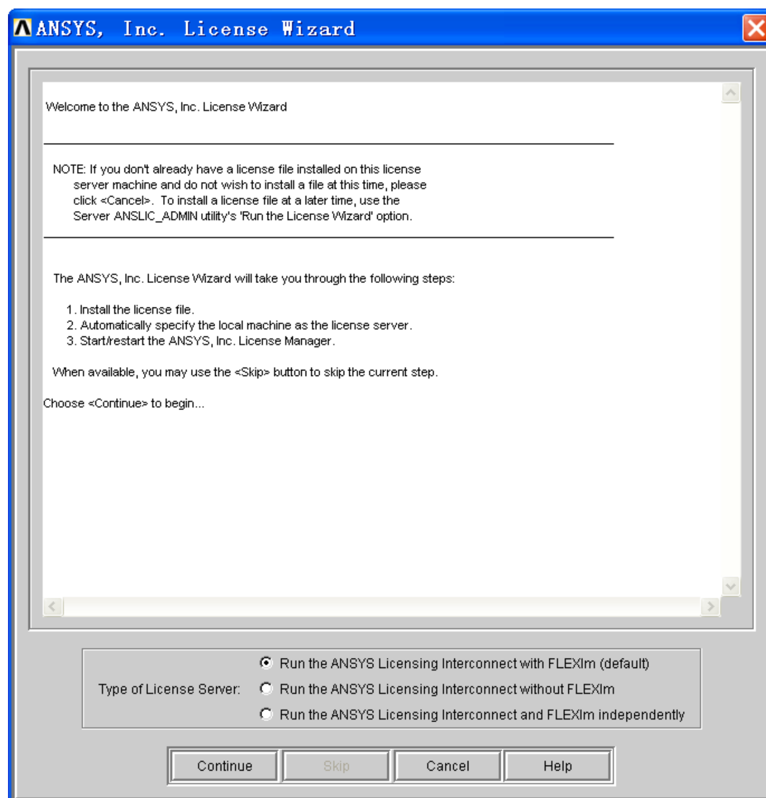


图 2-36 安装许可证服务器界面

27）单击“Continue”按钮，如图 2-37 所示，完成“Step 1：Install　license file”的操作。

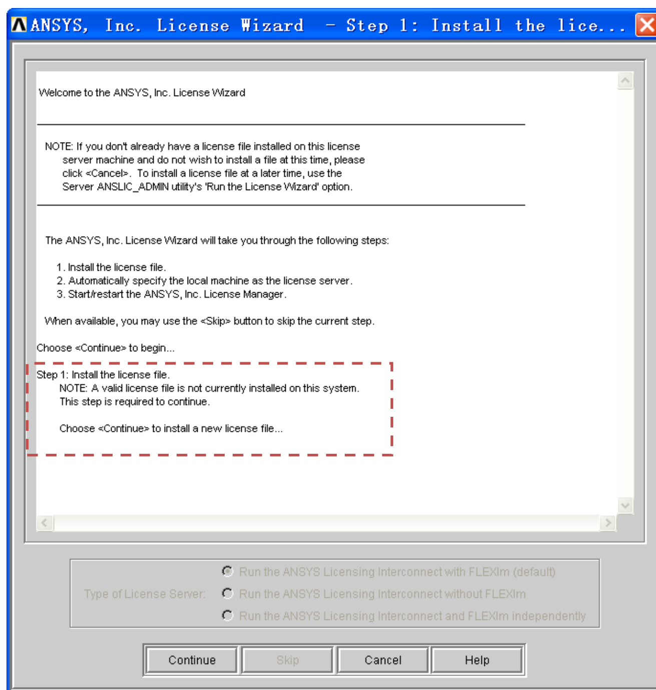


图 2-37　Step 1：Install　license file

28）单击“Continue”按钮，如图 2-38 所示，出现“Please choose the file”对话框。

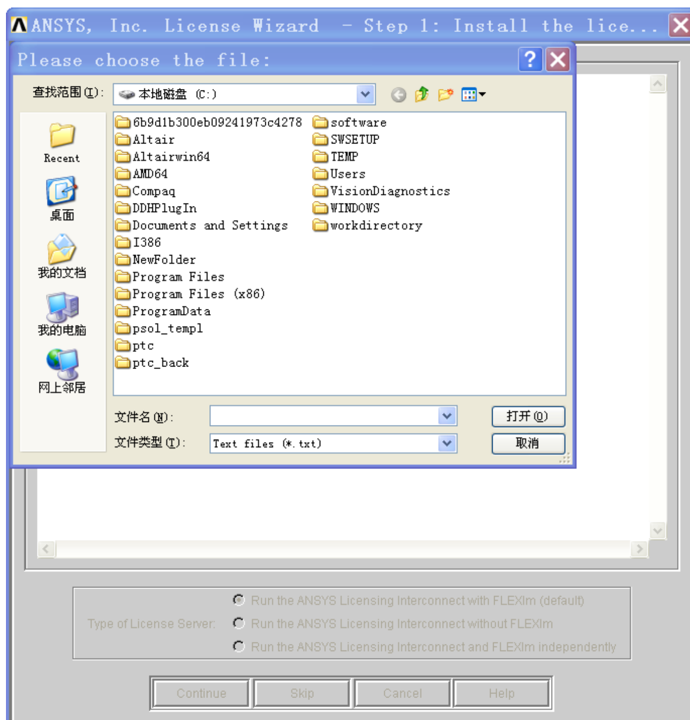


图 2-38　license 文件选择提示

29）建议把 license.txt 文件复制放在 C:\Program Files\ANSYS Inc\Shared Files\Licensing 目录下。将文件路径定位至该目录，选择 license.txt 文件，单击“打开”按钮，如图 2-39 所示。

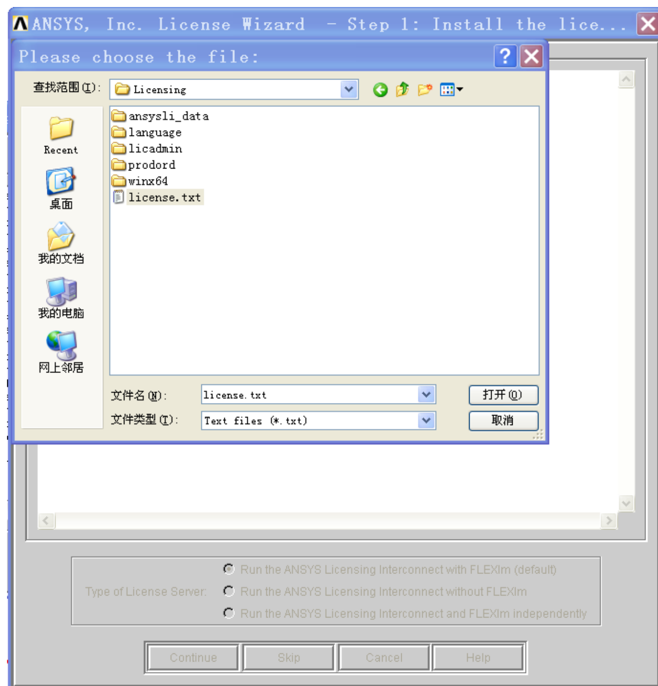


图 2-39　选择 license.txt 文件

30）完成“Step 2”的操作，如图 2-40 所示。

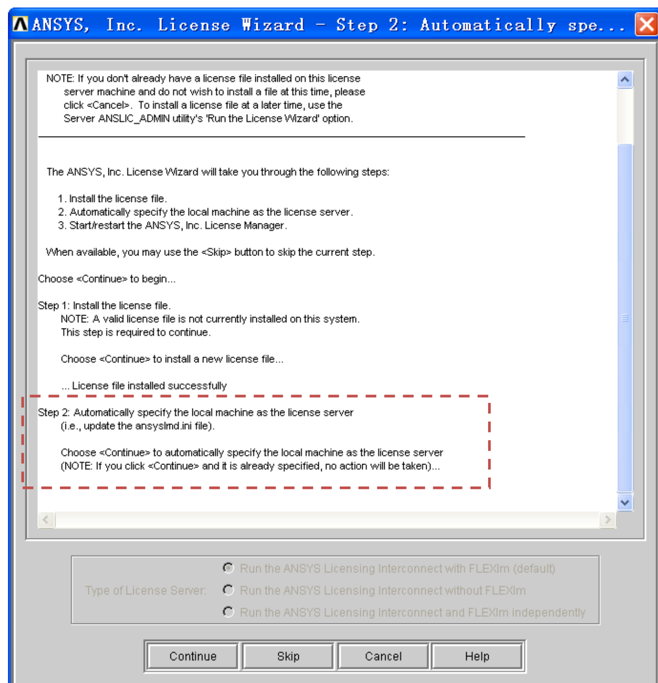


图 2-40　完成“Step 2”的操作

31）单击“Continue”按钮，完成“Step 3”的操作，如图 2-41 所示。

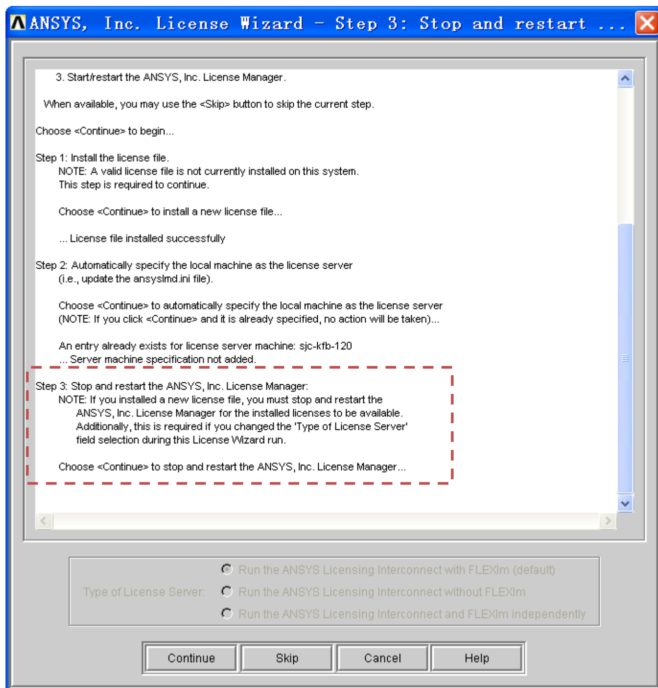


图 2-41　完成“Step 3”的操作

32）Step 3 完成后，继续单击“Continue”按钮，进入如图 2-42 所示的界面。至此，软件安装完成。

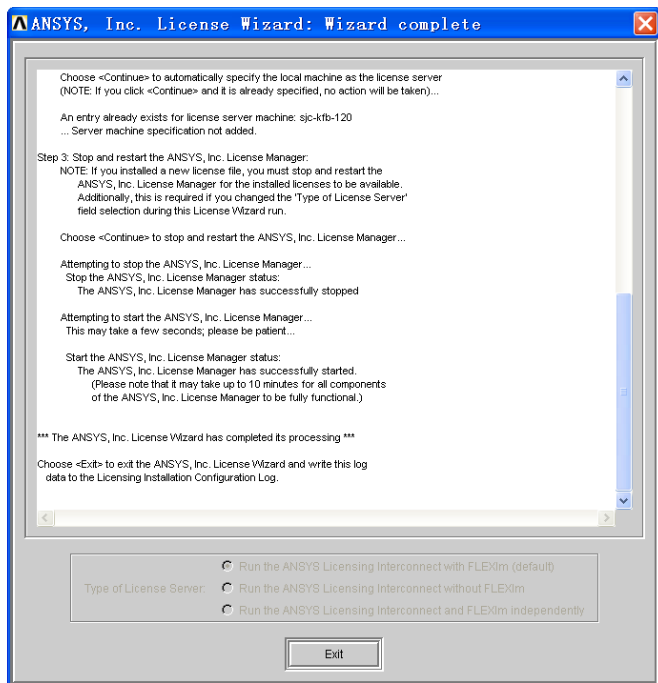


图 2-42　完成软件安装

33）单击“Exit”按钮退出，回到如图 2-43 所示的界面。

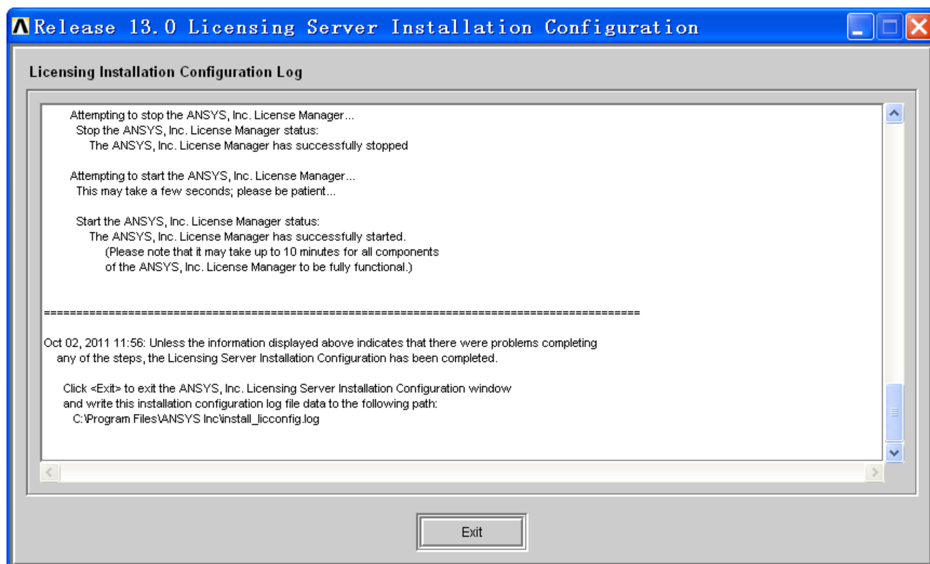


图 2-43　License Server 安装完成

34）最后单击“Exit”按钮退出，回到如图 2-44 所示的界面。

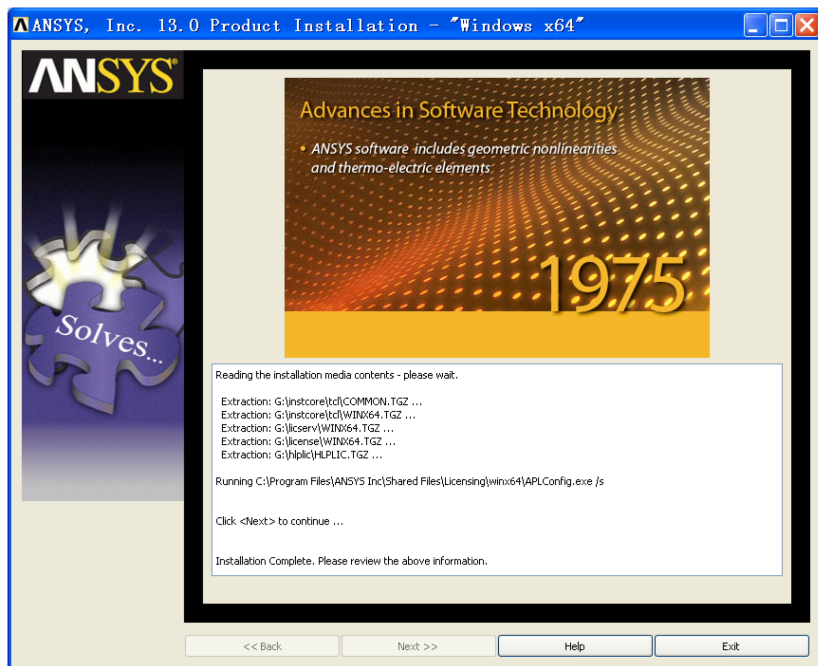


图 2-44　ANSYS 产品安装完成

35）单击最后的“Exit”按钮退出，最后在最初的安装界面上单击“Exit”按钮，至此退出所有安装程序，如图 2-45 所示。



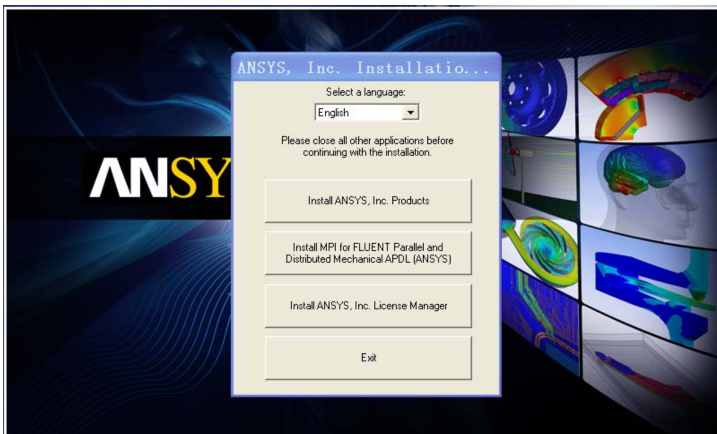


图 2-45　退出所有安装程序

2.3　FLUENT 的用户界面

2.3.1　启动 FLUENT

如图 2-46 所示，单击[开始]>[所有程序]>[ANSYS 13.0]>[Fluid Dynamics]> [FLUENT]菜单命令，运行 FLUENT 软件。

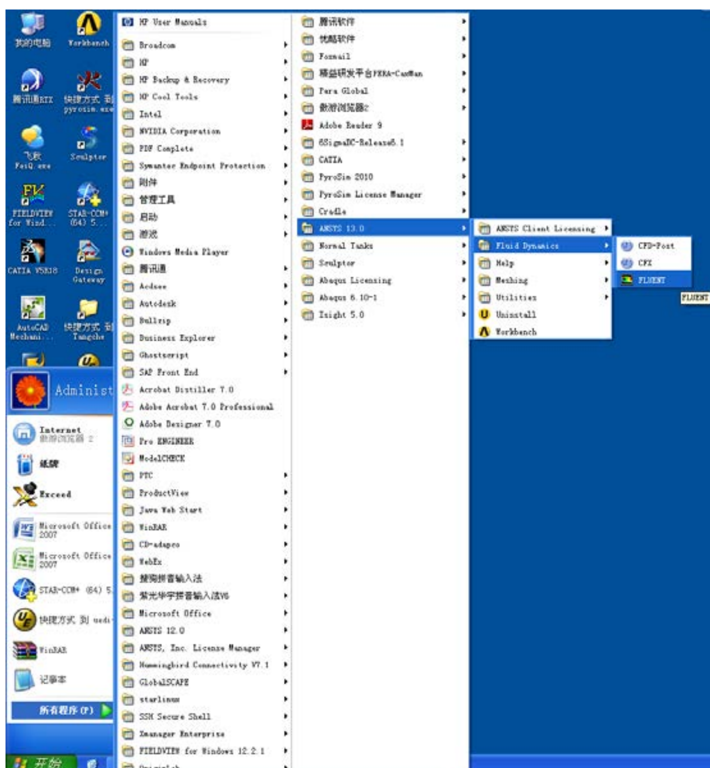


图 2-46　启动 FLUENT

FLUENT 启动界面如图 2-47 所示。其中，“Dimension”项分别指二维模型（2D）或三维模型（3D）；“Display Options”项中，“Display Mesh After Reading”指读入网格后即显示网格，“Embed Graphics Windows”指在软件主界面显示视图区窗口，“Workbench Color Scheme”指采用 Workbench 的色彩方案；“Options”项中，“Double Precision”指双精度，“Use Job Scheduler”指采用工作进度表，采用并行计算时（见图 2-48），将出现“Use Remote Linux Nodes”选项，指采用远程节点；“Processing Options” 项中，“Serial”指单核运行方式，而“Parallel（Local Machine）”指并行运行方式。

如图 2-48 所示，选择“Parallel（Local Machine）”方式，可以设置并行计算的核数。

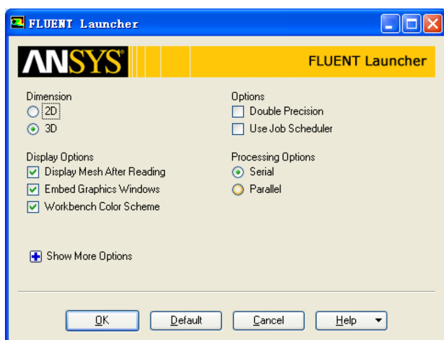


图 2-47 FLUENT 启动界面

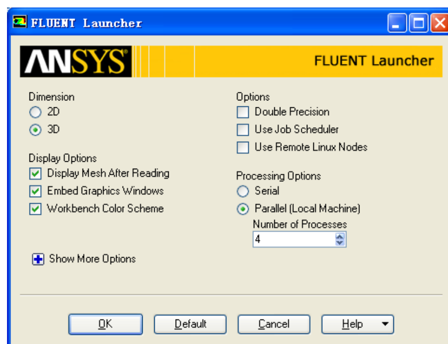


图 2-48 FLUENT 并行计算方式

单击“Show More Options”，展开启动界面，如图 2-49 所示。此处不再详述。

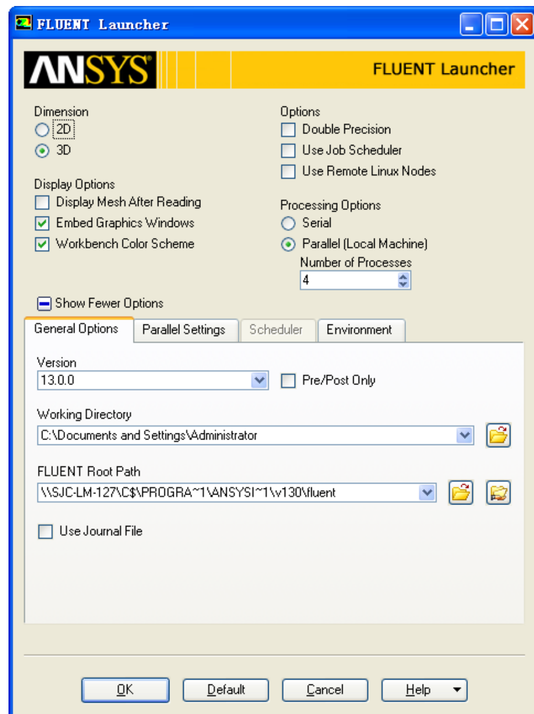


图 2-49 展开启动界面

图 2-50 和图 2-51 对比了不同的 Display Options 选项对应软件界面的不同。

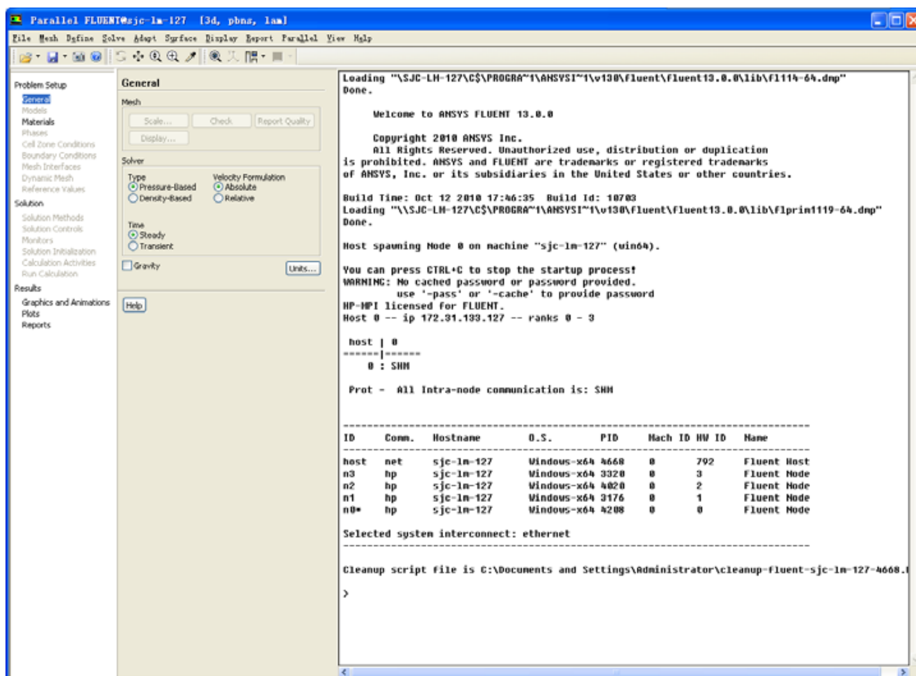


图 2-50　不在软件主界面显示视图区窗口

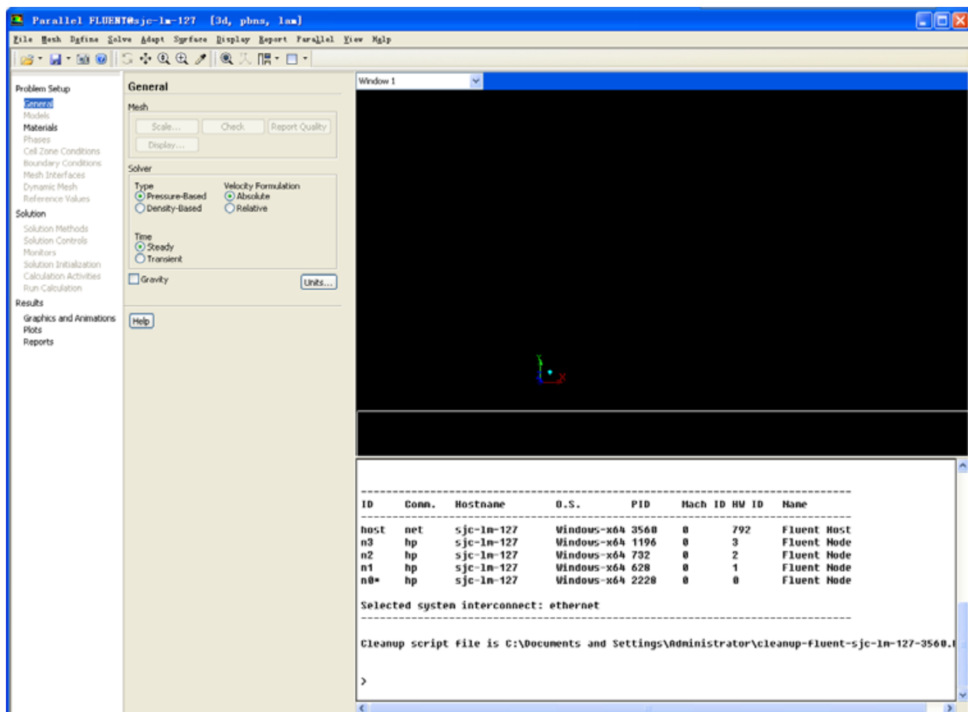


图 2-51　不采用 Workbench 的色彩方案

保持图 2-48 中的默认设置，单击“OK”按钮，进入软件主界面，进行网格导入和求解计算设置。

2.3.2 菜单项

图 2-52 所示为采用默认设置打开的 FLUENT 软件主界面。

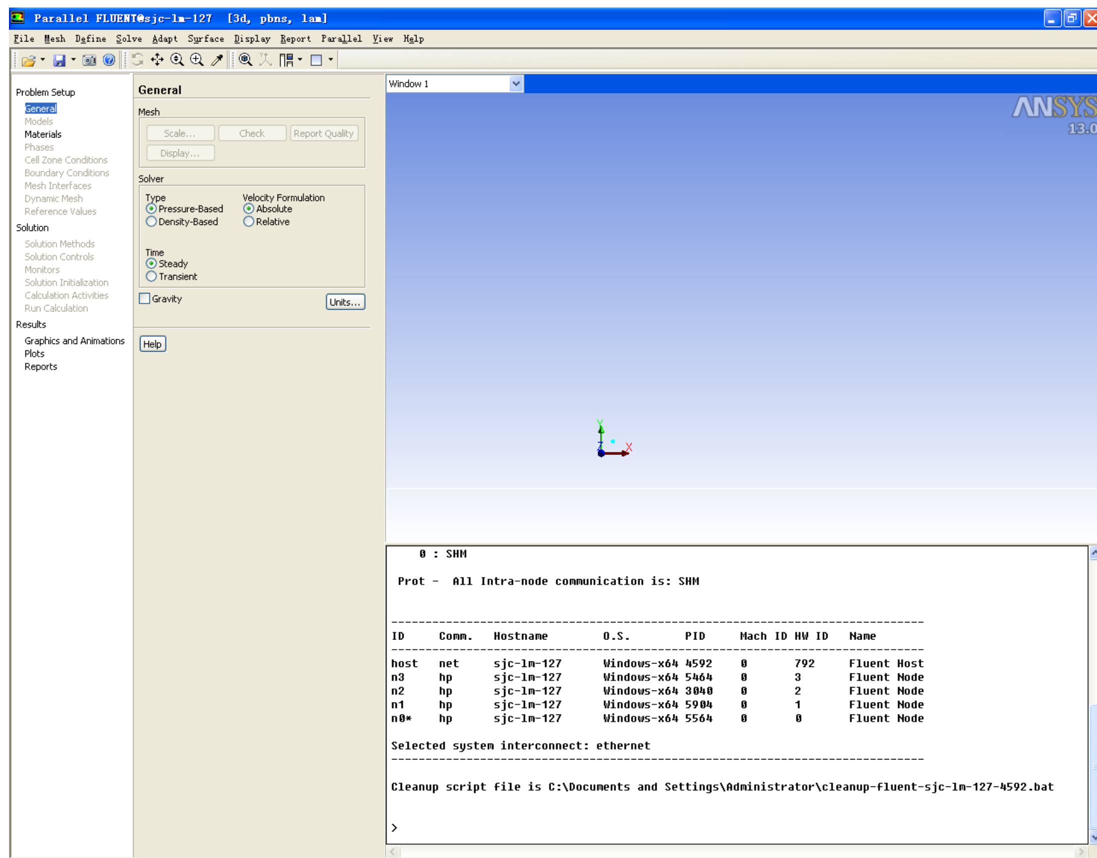


图 2-52 FLUENT 软件主界面

FLUENT 软件的菜单项依次如图 2-53～图 2-63 所示。

File 菜单主要用于读入（Read）/保存（Write）case 文件、mesh 文件（经 FLUENT 定义后的文件，用于记录计算模型和计算设置等）和 dat 文件（经 FLUENT 计算后的数据结果文件）；导入（Import）计算用网格等；导出（Export）结果数据；流固耦合数据映射（FSI Mapping）；保存图片（Save Picture...）；批处理（Batch Options...）等。

Mesh 菜单主要用于检查网格（Check）、网格质量分析（Info）、多面体网格转化（Polyhedra）、网格合并（Merge）与分割（Separate）、网格重整（Reorder）、网格缩放（Scale...）、网格平移（Translate...）、网格旋转（Rotate...）与网格光顺（Smooth/Swap）等。

Define 菜单主要用于定义各种求解模型的相关设置。



图 2-53 File 菜单



图 2-54 Mesh 菜单

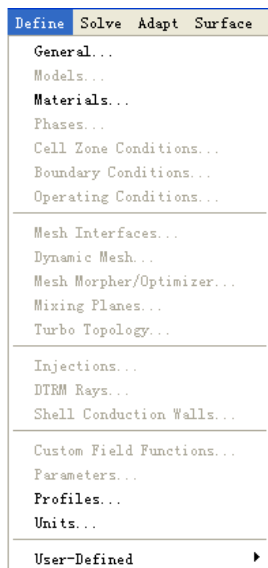


图 2-55 Define 菜单

Solve 菜单主要用于定义各种求解方法（Methods...）、监测点（Monitors..）的相关设置，计算初始化（Initialization...）以及运行计算（Run Calculation...）。

Adapt 菜单主要用于依据各种边界（Boundary...）、区域（Region...）与体积（Volume...）等进行网格自适应。

Surface 菜单主要用于点（Point..）、迹线（Line/Rake...）和等值面（Iso-Surface...）等后处理功能的设置。

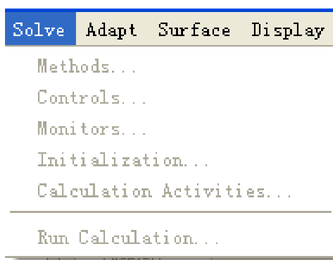


图 2-56 Solve 菜单



图 2-57 Adapt 菜单

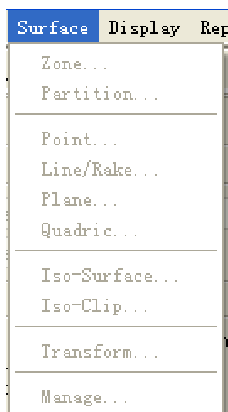


图 2-58 Surface 菜单

Display 菜单主要用于图表/动画（Graphics and Animations..）、图例（Colormap...）、注释（Annotate...）等后处理功能的设置。

Report 菜单主要用于各种计算结果后处理功能的设置。

Parallel 菜单主要用于网格分区（Auto Partition...）和线程控制（Thread Control...）等功能的设置。



图 2-59 Display 菜单

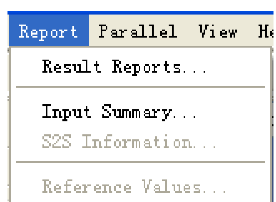


图 2-60 Report 菜单

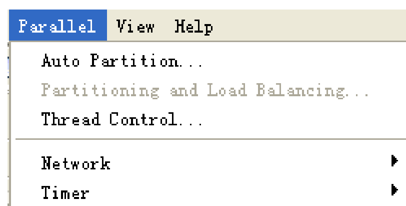


图 2-61 Parallel 菜单

View 菜单主要用于工具栏（Toolbars）、视图区（Graphics Window）等软件功能区域的显示设置。

Help 菜单包括软件自带的帮助内容和帮助使用说明，并可进行软件使用相关问题的查询。

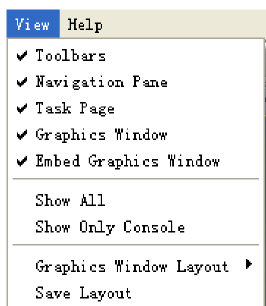


图 2-62 View 菜单

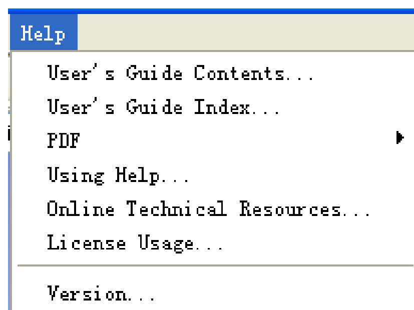


图 2-63 Help 菜单

2.3.3 项目树

FLUENT 用户界面中的项目树设计为从上至下排列，如图 2-64 所示。在项目树中选择要设置的菜单项，参数输入窗口在右侧打开。项目树右侧对应为项目树菜单项的属性栏。

可以看到，Problem Setup 栏包括 General、Models、Materials、Phases、Cell Zone Conditions、Boundary Conditions、Mesh Interfaces、Dynamic Mesh 和 Reference Values 9 项，根据具体计算项目的不同，进行不同项的设置。Solution 栏包括 Solution Methods、Solution Controls、Monitors、Solution Initialization、Calculation Activities 和 Run Calculation 6 项。Results 栏包括 Graphics and Animations、Plots 和 Reports 3 项。

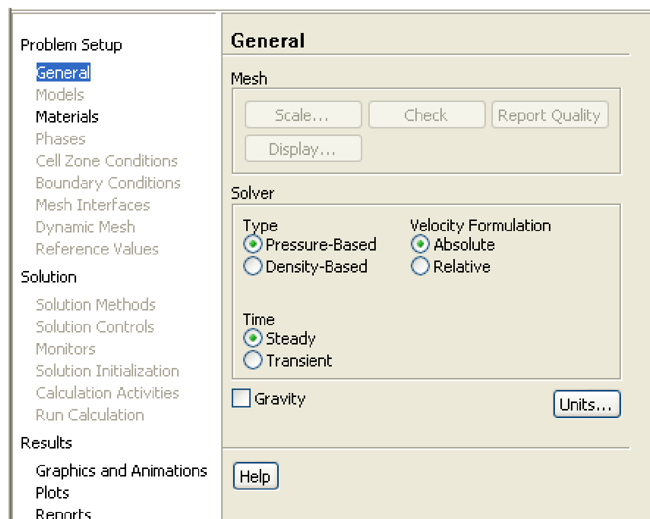


图 2-64　项目树

2.3.4　鼠标功能

鼠标功能和二维/三维求解器的选择有关，可以在求解器中设定。一般情况下，对于 2D 求解器，左键表示平移；中键表示缩放；右键表示选择。对于 3D 求解器，左键表示旋转；中键表示缩放；中键单击表示确定中心点；右键表示选择。

FLUENT 具有便捷的流场探针功能，右键单击屏幕视图，即可在信息栏输出该点的流场信息。

2.4　FLUENT 的求解技巧

2.4.1　FLUENT 的数值算法

FLUENT 软件采用有限体积法，提供了 3 种数值算法：非耦合隐式算法、耦合显式算法、耦合隐式算法，分别适用于不可压、亚音速、跨音速、超音速乃至高超音速流动。

（1）非耦合隐式算法

非耦合隐式算法（Segregated Solver）源于经典的 SIMPLE 算法，适用于不可压缩流动和中等可压缩流动。该算法对动量方程进行了压力修正，而不用对 N-S 方程组联立求解，目前已在多个领域得到了成熟的发展和经验验证。非耦合隐式算法又称分离式算法，拥有多种燃烧、化学反应及辐射、多相流模型与其配合，适用于低速流动的 CFD 模拟。

（2）耦合显式算法

耦合显式算法（Coupled Explicit Solver）是由 FLUENT 软件设计人员与 NASA 联合开发的，用于求解可压缩流动。有别于 SIMPLE 算法，耦合显式算法对整个 N-S 方程组联立求解，空间离散采用通量差分分裂格式，时间离散采用多步 Runge-Kutta 格式，并采用了多重

网格加速收敛技术。对于稳态计算，还采用了当地时间步长和隐式残差光顺技术。该算法稳定性好，内存占用少，应用广泛。

（3）耦合隐式算法

耦合隐式算法（Coupled Implicit Solver）是 FLUENT 软件特有的算法。该算法也对整个 N-S 方程组联立求解，由于其采用隐式格式，因而计算精度和收敛性要优于耦合显式算法，但需要占用较多的内存资源。该算法可以求解低速流动到高速流动大范围的工况。



2.4.2 FLUENT 的湍流模型

FLUENT 软件中的湍流模型主要包括：

（1）混合长度模型

零方程模型，模拟简单的流动，计算量小。

（2）Spalart-Allmaras 模型

直接求解修正的湍流粘性的一个方程模型，针对大网格的低成本湍流模型，适用于模拟气动和封闭腔内流动，可以选择包括湍动能产生项的应变率，以提高对涡流的模拟精度（如叶轮机械、车体、机身和导弹等）。

（3）标准 k-ε 模型

求解 k 和 ε 的基本两方程模型，模型系数通过实验拟合得到，适合完全湍流情况的初始迭代、设计选型和参数研究，鲁棒性最好，可以处理粘性加热、浮力和压缩性等物理现象。

（4）RNG k−ε 模型

k–ε 方程中的常数是通过重正规化群理论分析得到的，而不是通过实验得到的，修正了耗散率方程，适用于设计快速应变、中等涡、局部转捩的复杂剪切流动（如边界层分离、室内通风、块状分离和涡的后台阶分离等）。

（5）Realizable k−ε 模型

与 RNG k−ε 模型性能相似，但计算精度更优。耗散率(ε)方程由旋涡脉动的均方差导出，可精确预测平板和圆柱射流的传播，对包括旋转、有大反压力梯度的边界层、分离和回流等现象有更好的预测结果。

（6）标准 k−ω 模型

标准 k−ω 模型包含压缩性效应，转捩流动和剪切流修正等子模型，在模拟近壁面边界层、自由剪切和低雷诺数流动时性能更好，可以用于模拟转捩和逆压梯度下的边界层分离（如高速列车外流模拟和旋转力学性能计算等）。

（7）SST k−ω 模型

SST k–ω 模型（Shear Stress Transport k–ω 模型，SSTKW 模型）在近壁面处使用 k–ω 模型，而在边界层外采用 k–ε 模型，包含了修正的湍流粘性公式，考虑了湍流剪切应力的效应。SST 一般能更精确地模拟反压力梯度引起的分离点和分离区大小。与标准 k−ω 模型的性能类似，对于壁面距离的依赖，使得它不适合于模拟自由剪切流动。

（8）雷诺应力模型

雷诺应力模型（RSM 模型）是最好的基于雷诺平均的湍流模型，它通过平均速度脉动的乘积，导出 6 个独立的雷诺应力分量输运方程，避免各向同性涡黏性假设，需要

更多的 CPU 时间和内存消耗，适用于模拟强旋转流和涡的高度各向异性流、复杂三维流动。由于方程间的强耦合性，所以收敛稍差。

（9）大涡模拟

大涡模拟用于模拟瞬态的大尺度涡，通常和 F-W-H 噪声模型联合使用。

（10）分离涡模拟

分离涡模拟改善了大涡模拟的近壁处理，更为实用，可以模拟大雷诺数的气体流动。

（11）V2F 湍流模型

V2F 湍流模型与标准 $k-\omega$模型的性能类似，但结合了近壁湍流各向同性和非局部压力应变效应。

截至目前，没有一个适用于所有流动的高级模型，用户应根据实际情况选择湍流模型。选择湍流模型时一般应考虑以下因素：流动现象；计算机资源；项目要求；计算精度；计算时间；近壁面处理的选择。

湍流模型的选择一般应按下述流程进行：

1）计算特征雷诺数，判断是否是湍流。

2）如果存在转捩，考虑使用转捩模型。

3）划分网格前，预估近壁面的 y+。

4）除了低雷诺数流动和复杂近壁面现象（非平衡边界层）外，用壁面函数方法确定如何准备网格以 RKE（Realizable $k-\varepsilon$）开始，如果需要，改用 S−A，RNG，SKW，SST 或者 V2F。

5）对高度旋涡流动、三维、旋转流动，使用 RSM。

以钝体平板流为例，用 4 种不同的湍流模型模拟了绕过钝体平板的流动。平板绕流的计算模型如图 2−65 所示，共采用 8700 个四边形网格，在回流再附着区和前缘附近加密，并进行了非平衡边界层处理。

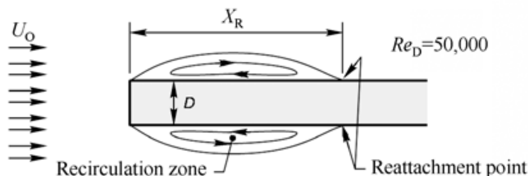


图 2−65　平板绕流的计算模型

湍流动能强度计算结果对比如图 2−66 所示。可以看出，相对于标准 $k-\varepsilon$ 模型，其他 3 种方法的湍流动能强度（Turbulent Kinetic Energy）计算结果较接近，也较准确。

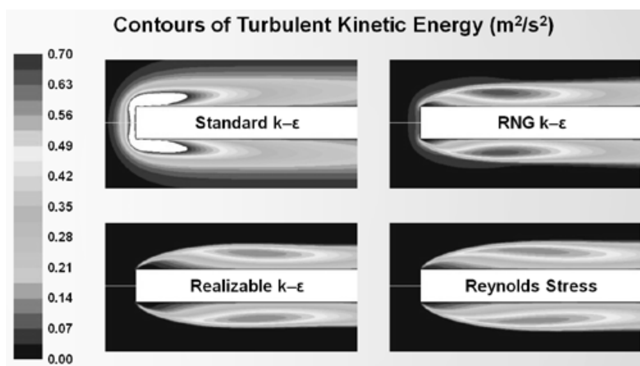


图 2−66　湍流动能强度计算结果对比

2.4.3 FLUENT 的物理模型

1. 多相流模型

相具有可定义的边界，对周围流场有特定的动力响应。相一般分为固体、液体和气体，但也可指其他形式：有不同化学属性的材料，但属于同一种物理相（如液-液等）。

多相流体系统分为一种主流体相和多种次流体相，如图 2-67 所示。其中一种流体是连续的（主流体，Primary Phase）；其他相是离散的（Secondary Phase），存在于连续相中；可以有多种次流体相，代表不同尺寸的颗粒。常见的多相流体系统如图 2-67 所示。

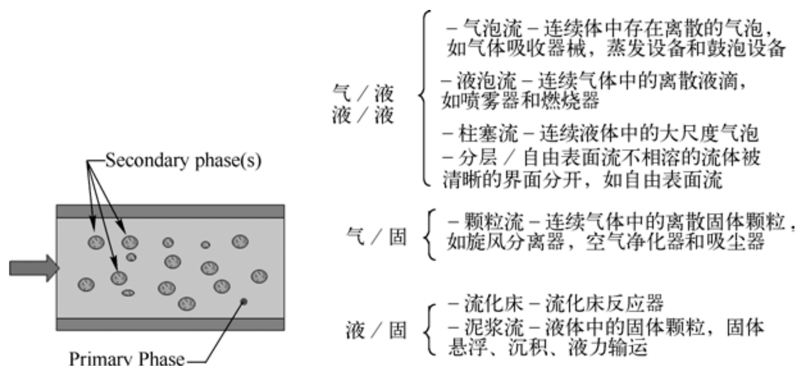


图 2-67　常见的多相流体系统

FLUENT 包括 4 种不同的多相流模型：Discrete Phase Model（DPM）、Volume of Fluid Model（VOF）、Eulerian Model 和 Mixture Model。

选择合适的多相流模型非常重要，这取决于流体是分层的，还是离散的（由两相间的长度尺度界定）；还需要考虑 Stokes 数（颗粒松弛时间和流体特征时间的比例）。

2. 化学反应流模型

FLUENT 包含了从计算均相反应到非均相反应的多个反应模型，如炉子、锅炉、热处理炉、燃气轮机、火箭发动机和内燃机等。

（1）污染物模型

污染物模型包括：

- ✧ NOx 形成模型。用于预测定性的 NOx 形成趋势。FLUENT 包括 3 种 NOx 产生机理：Thermal NOx、Prompt NOx、Fuel NOx。典型案例：喷入氨水或尿素。
- ✧ 烟灰形成模型。包括 Moos-Brookes 模型、一步模型、两步模型。典型案例：烟灰对辐射吸收的影响。
- ✧ SOx 形成模型。包括求解 SO2，H2S 或 SO3 方程。一般的 SOx 预测都作为后处理过程来进行。

（2）DPM 模型

DPM 模型特征包括：

- ✧ 颗粒/液滴/气泡的轨迹在拉格朗日坐标系求解。
- ✧ 颗粒和连续相可以进行热、质量、动量的交换。
- ✧ 每一条轨迹代表一组有相同初始属性颗粒的行为。

✧ 单个颗粒的互相影响被忽略。

✧ 离散相体积分数必须小于 10。

多个子模型包括：

✧ 离散相的加热/冷却。

✧ 液滴的蒸发和沸腾。

✧ 可燃固体的挥发分析和焦炭燃烧。

✧ 喷雾模型模拟液滴破碎和聚合。

✧ 磨损/增长。

应用范围包括颗粒分离、分级、喷雾干燥、浮质沉积、气泡喷射、液体燃料和煤粉燃烧等。

（3）表面反应

对于化学组分沉积到表面的反应，将沉积的组分处理为和气相组分不同的另外一种组分。

对每个吸收表面组分求解地点平衡方程；

✧ 可以考虑详细表面反应机理（任意的多步反应，任意数量的气相组分/沉积组分）。

✧ CHEMKIN 中的表面反应机理可以读入 FLUENT。

✧ 表面反应可以在壁面或多孔介质中发生。

✧ 可以在不同的表面定义不同的表面反应机理。

应用范围包括催化反应和 CVD（化学沉积）。

3. 动网格

模拟运动部件有 5 种方法：单参考坐标系法、多参考坐标系法、混合平面法、滑移网格法和动网格法。前 3 种方法主要用于稳态，而滑移网格和动网格本质是瞬态的。激活这些模型，将流体域由固定改为动坐标系或动网格设置。大多数物理模型和动坐标系或动网格法兼容（如多相流、燃烧和传热等）。

许多问题需要考虑平移或旋转的部件。对移动域，有两种基本的模型方法：

✧ 运动的参考坐标系，包括单参考坐标系法、多参考坐标系法和混合平面法。参考坐标系和运动域联系在一起，通过修正控制方程来考虑运动坐标系。

✧ 运动/变形域，包括滑移网格法和动网格法。域的位置和形状在静止坐标系下跟踪，求解本质上是瞬态的。

（1）单参考坐标系模型

单参考坐标系模型（SRF）把单一的运动域和一个坐标系连接起来。所有的流体域在运动坐标系下定义，并在旋转坐标系中引入了附件加速度。使用运动坐标系的意义在于：在静止坐标系下流场是瞬态的，使用旋转坐标系后可以把流场看做是稳态的。其优势在于：①用稳态方法求解；②边界条件更简单；③调试更快捷；④更容易的后处理的分析。

（2）多参考坐标系模型

单参考坐标系不适合包括有静止域和运动域的多域问题。此时可以把域分割为多个域，一些域旋转，一些域静止。域之间通过交界面（Interface）传递数据。多域问题（叶轮+蜗壳）如图 2-68 所示。对于域之间的交界面，处理方式分为以下几种：①多参考坐标系模型（MRF）稳态（近似）；②混合平面模型（MPM）稳态（近似）；③滑移网格模型（SMM）

瞬态（精确）。

（3）混合平面模型（MPM）

混合平面模型（MPM）方法是对多级轴流和离心旋转机械的稳态解法，适合于求解由多个单通道、旋转或静止流体域组成，有自己的进口、出口、壁面和周期边界（每个域是一个 SRF 模型）的求解域，如图 2-69 所示的多级叶轮问题。

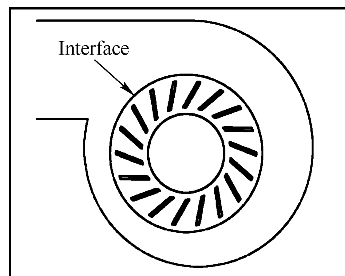


图 2-68 多域问题（叶轮+蜗壳）

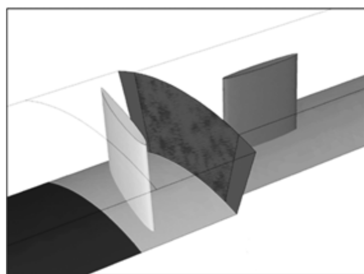


图 2-69 多级叶轮问题

MPM 方法的做法是：①对每个域求解稳态的 SRF，通过边界条件链接各个域，链接域的边界称为混合平面；②通过混合平面的变量是周向平均值，随每步迭代更新，分布可以是径向或轴向；③求解收敛后，混合平面将调整为一般流动条件。

MPM 的优势在于求解只需要一个流道，和叶片数量无关。

（4）滑移网格模型

在旋转机械中，由静止部件和旋转部件的相对运动导致的瞬态相互作用一般分为位差相互作用（压力波相互作用）、尾迹相互作用和激波相互作用 3 种情况。MRF 和 MPM 模型都忽略了瞬态相互作用，仅限于瞬态效应小的流动。而如果瞬态效应不能忽略，则可以使用滑移网格模型（SMM）方法考虑静止部件和旋转部件的相对运动。

SMM 模型与 MRF 模型类似，计算域分为运动域和静止域，由非一致网格界面连接，如图 2-70 所示。与 MRF 模型不同的是，SMM 模型每个域的网格是时间的函数，随时间改变，这样使得问题本身就是瞬态的。

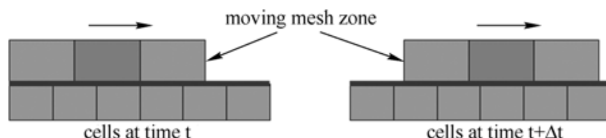


图 2-70 滑移网格的运动形式

SMM 模型和 MRF 模型的另一个不同之处是，控制方程有新的动网格形式，在静止坐标系下求解绝对量。没有使用运动坐标系形式，如动量方程源项中没有附加加速度的作用；方程组是通用的运动/变形网格形式的一种特殊情况，而假设为刚性网格运动和滑移，非一致网格界面。

（5）动网格（DM）

FLUENT 的动网格技术，可以帮助用户解决诸如内燃机马达内的活塞运动、容积泵、机翼摆动、阀门开关过程、动脉扩张和收缩等复杂问题。

FLUENT 引入动网格模型来移动边界，并调整网格。动网格的生成方法如图 2-71 所示。

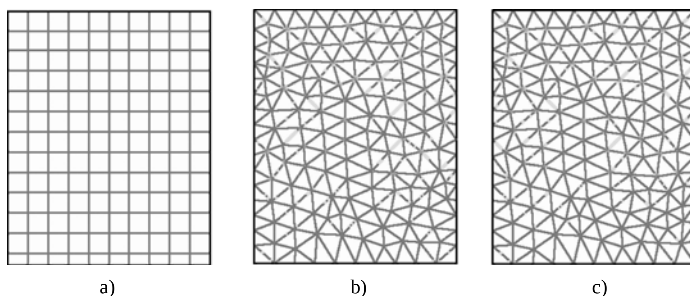


图 2-71　动网格的生成方法

a) 层铺法　b) 局部重划法　c) 弹簧式

① 层铺法：随着边界的移动，单元层生成或消失。单元层对应的面网格只能是四边形，对应的体网格只能是结构网格（六面体或 O 型网格），适用于边界在小范围或大范围内的线性或旋转运动。

② 局部重划法：随着边界移动，网格扭曲大的区域网格重新划分，适用于三角形/四面体网格类型，边界运动范围大。

③ 弹簧式：适用于小范围的边界变形，单元的连接和数量不变，也适用于小范围变形的三角形/四面体网格。

2.4.4 FLUENT 的边界条件

在讲述 FLUENT 的边界条件前，先要明确以下 3 个概念。

（1）流体域

流体域是一系列单元的集合，需要选择流体材料，在其上求解所有激活的方程。对多组分或多相流，流体域包含这些相的混合物。

输入的选择项包括多孔介质域（Porous Zone）、层流域（Laminar Zone）、源项（Source Terms）、固定值域（Fixed Values）、辐射域（Participates In Radiation）。流体域可输入的选择项如图 2-72 所示。

（2）多孔介质

多孔介质是一种特殊的流体域。可在 Fluid 面板中激活多孔介质域，通过用户输入的集总阻力系数来确定流动方向的压降。“多孔介质设置”对话框如图 2-73 所示。

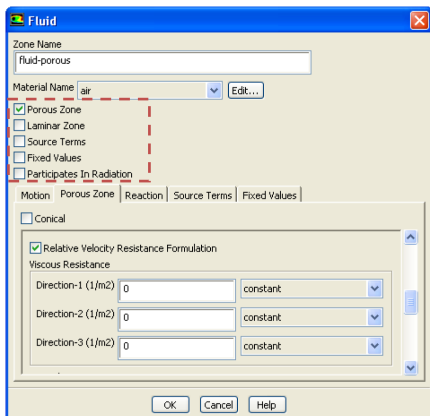


图 2-72　流体域可输入的选择项

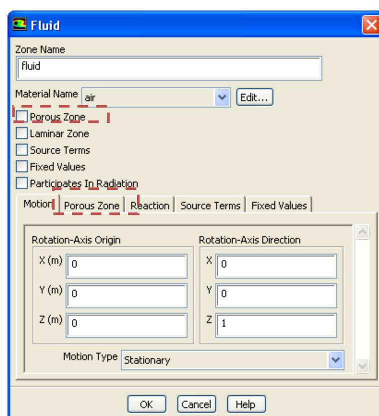


图 2-73　“多孔介质设置”对话框

多孔介质可用来模拟通过多孔介质的流动，或者流过其他均匀阻力的物体，如堆积床、过滤纸、多孔板、流量分配器和管束等。一般设置方法为：输入各方向的粘性系数和惯性阻力系数。

（3）固体域

固体域是一组只求解导热问题，而不求解流动方程的单元集合。设置时，只需从材料库中输入对应名称的材料即可。选择项“Source Terms”允许输入体积热源，如图 2-74 所示。注意，如果临近固体域的单元是旋转周期边界，则需要指定旋转轴。

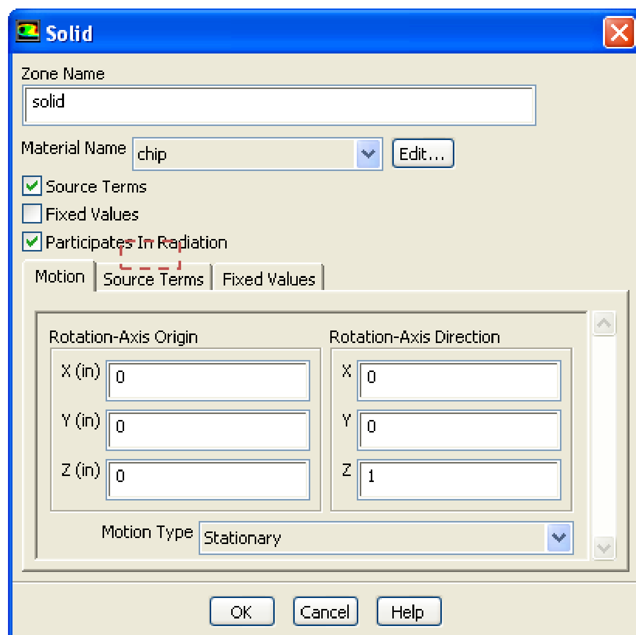


图 2-74 “固体域设置”对话框

FLUENT 的边界条件包括：

1）流动进、出口边界条件。

2）壁面、轴对称和周期性边界。

3）Internal cell zones：fluid，solid（porous is a type of fluid zone）。

4）Internal face boundaries：fan，radiator，porous jump，wall，interior。

1. 流动进口、出口边界条件的种类

FLUENT 提供了 10 种类型的流动进、出口条件，它们分别是：

1）速度进口条件：给出进口速度及需要计算的所有标量值，如图 2-75 所示。

✧ 指定速度，需要输入的参数包括速度大小，垂直入口；方向分量；大小和方向。

✧ 指定入口均匀速度分布。如用 UDF 或者分布文件，可以指定分布入口条件。

✧ 速度入口用于不可压流动，不建议用于压缩流。

✧ 速度大小是负值，则意味着出口。

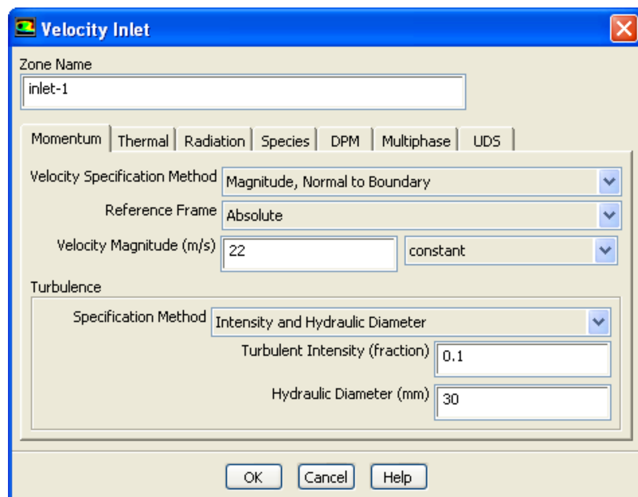


图 2-75　速度进口条件

2）压力进口条件：给出进口的总压和其他需要计算的标量进口值，如图 2-76 所示。

✧ 压力入口适用于压缩和不可压缩流。
✧ 压力入口被处理为从滞止点到入口的无损失过渡。
✧ FLUENT 计算静压和入口的速度。
✧ 通过边界的流量随内部求解和指定的流动方向而改变。
✧ 需要输入的参数包括表总压、超音速/初始表压、入口流动方向、湍流量（对于湍流情况）和总温（如果有传热和/或压缩）。

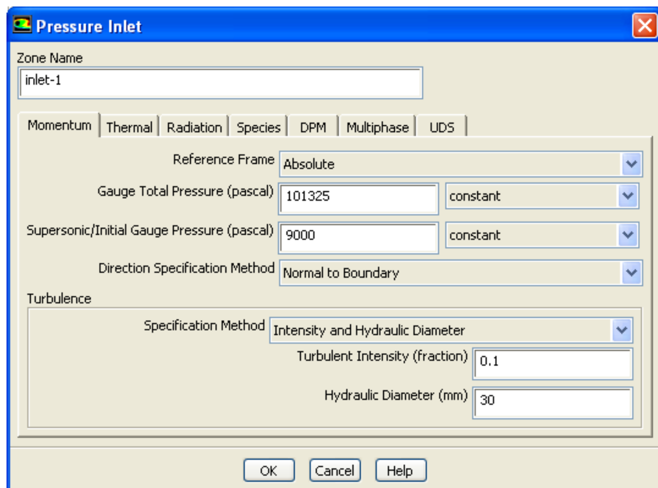


图 2-76　压力进口条件

3）流量进口条件：主要用于可压缩流动，给出进口的质量流量，如图 2-77 所示。对于不可压缩流动，由于密度是常数，所以没有必要采用该边界条件。

需要输入的参数包括质量流量或流率、超音速/初始表压（如果当地为超音速，取静

压，如果是亚音速，忽略此项；如果初场由此边界设定，就用于初场计算）和总温（在 Thermal 面板上，对不可压缩流取静温）。

4）压力出口条件：给定流动出口的静压，如图 2-78 所示。对于有回流的出口，该边界条件比 outflow 边界条件更容易收敛。

✧ 适用于压缩和不可压流动。

✧ 如果流动在出口是超音速的，指定的压力被忽略。

✧ 在外流或非封闭区域流动，作为自由边界条件。

✧ 要求输入的参数包括表压（流体流入环境的静压）和回流量（当有回流发生时，起到进口的作用）。

✧ 对理想气体（可压缩）流动，可以使用无反射出口边界条件。

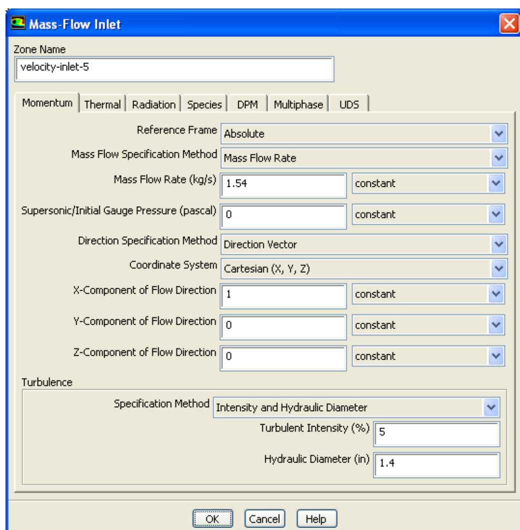


图 2-77　流量进口条件

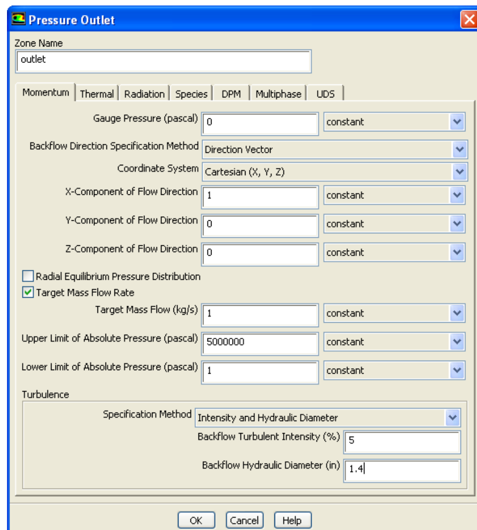


图 2-78　压力出口条件

5）压力远场条件：该边界条件只对可压缩流动适合，用来模拟无穷远处的可压缩自由流，输入静压和自由流马赫数；只有用理想气体计算时可以使用压力远场条件。

6）outflow 条件：该边界条件用以模拟在求解问题之前，无法知道出口速度或者压力；出口流动符合完全发展条件，除压力外，出口处其他参量梯度为零的不可压缩流动如图 2-79 所示。该边界条件不适合可压缩流动。

✧ 不需要压力或速度信息，出口平面的数据由内部数据外插得到，边界上加入质量流量平衡。

✧ 所有变量的法向梯度为零，流体在边界为充分发展。

✧ outflow 条件针对不可压缩流动，不能和压力进口同时使用（必须和速度进口一起使用），不能用于变密度的非稳态流动。

✧ 有回流时收敛性很差。

✧ 最终解如有回流，就不能使用此条件。

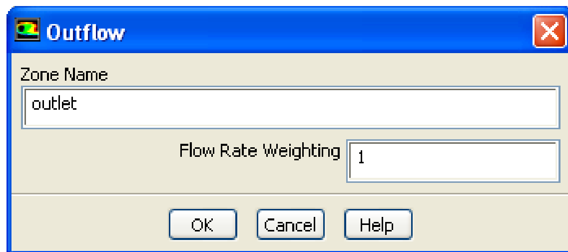


图 2-79　outflow 条件

7）inlet vent 条件：进口风扇条件需要给定一个损失系数、流动方向、环境总压和总温。

8）intake fan 条件：进口风扇条件需要给定压降、流动方向、环境总压和总温。

9）outlet vent 条件：排出风扇给定损失系数、环境静压和静温。

10）exhaust fan 条件：排出风扇给定压降和环境静压。

11）壁面边界条件：黏性流动中，壁面采用无滑移边界条件，可以指定剪切应力；热边界条件，对于一维或薄壳导热计算，可以指定壁面材料和厚度；对于湍流，可以指定壁面粗糙度；壁面也可以设置平移或旋转速度。

12）对称面和轴：当流场和几何都是对称时，可以只分析一半区域，其对称面法向速度为零，对称面所有变量法向梯度为零。

2. 压力进口边界条件介绍

压力进口边界条件通常用于给出流体进口的压力和流动的其他标量参数，对计算可压和不可压问题都适合。压力进口边界条件通常用于进口流率或流动速度未知时的流动分析，这类流动在工程中较常见，如浮力驱动的流动问题等。压力进口条件还可以用于处理外部或非受限流动的自由边界。

压力进口条件需要输入的参数有总压、总温、流动方向、静压、湍流量（用于湍流计算）、辐射参数（考虑辐射）、化学组分质量分数（考虑化学组分）、混合分数及其方差（用 PDF 燃烧模型）、progress variable（预混燃烧计算）、离散相边界条件（稀疏相计算）及第二相体积分数（多相计算）等。

对于不可压缩流动：

$$p_{\text{total}} = p_{\text{static}} + \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{2-1}$$

式中　p_{total}——全压，单位为 Pa；

p_{static}——静压，单位为 Pa；

ρ——气流密度，单位为kg/m^3；

v——气流速度，单位为 m/s。

对于可压缩流动：

$$p_{\text{total}} = p_{\text{static}}\left(1 + \frac{k-1}{2}M^2\right)^{k/(k-1)} \tag{2-2}$$

式中　k——比热比；

M——气流马赫数。

流场中的压力 p_s' 包括了势压 $\rho_0 gx$，即 $p_s' = \rho_0 gx + p_s$，或 $\frac{\partial p_s'}{\partial x} = \rho_0 g + \frac{\partial p_s}{\partial x}$。把 $(\rho - \rho_0)g$ 在体积力源项中考虑，如果密度没有变化，则在压力计算中不需要考虑势压。我们输入的压力也不需要考虑势压。

3. 速度进口边界条件介绍

给定进口的速度及其他相关标量值。该边界条件适用于不可压缩流动问题，但对可压缩问题不适合，因为该进口条件会使进口的总温或总压有一定范围的波动。

输入量包括速度大小、方向或各速度分量；周向速度（轴对称有旋流动）和静温（考虑能量）等，如图 2-80 所示。

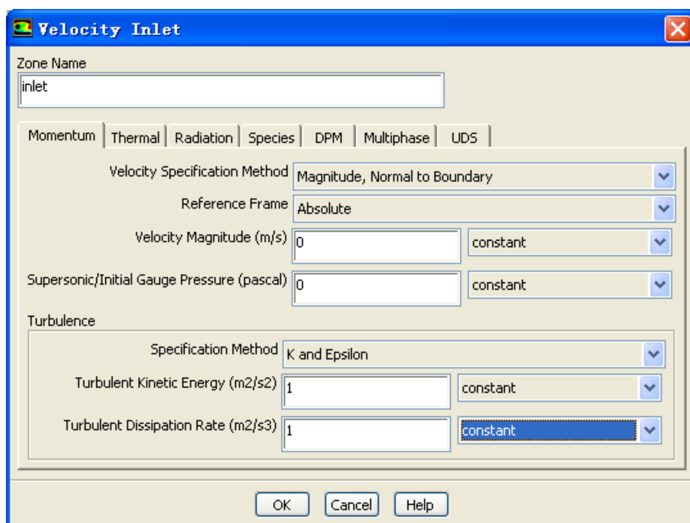


图 2-80 速度进口边界条件

4. 质量流量进口边界条件介绍

质量流量进口边界条件给定进口的质量流量。局部进口总压是变化的，用以调节速度，从而达到给定的流量，这使得计算的收敛速度变慢。所以，如果压力边界条件和质量边界条件都适合流动时，优先选择用压力进口条件。对于不可压缩流动，由于密度是常数，所以可以选用速度进口边界条件。

质量进口条件包括两种：质量流率和质量通量。质量流率是单位时间内通过进口总面积的质量。质量通量是单位时间单位面积内通过进口的质量。如果是二维轴对称问题，质量流率是单位时间内通过 2π 弧度的质量，而质量通量是单位时间内通过一弧度的质量。

5. 进口通风边界条件介绍

给定进口损失系数、流动方向、进口环境压力及温度。

对于进口通风模型，假定进口风扇无限薄，通风压降正比于流体动压头和用户提供的损失系数。假定 ρ 是流体密度，K_L 是无量纲损失系数，则流动方向上的压降 Δp 为

$$\Delta p = K_L \frac{1}{2}\rho v^2 \qquad (2\text{-}3)$$

式中 v——与通风方向垂直的速度分量，单位为 m/s。

6. 进口风扇边界条件介绍

给定压力阶跃、流动方向、环境（进口）压力和温度。假定进口风扇无限薄，并且有不连续的压力升高，压力升高量是通过风扇速度的函数。如果是反向流动，风扇可以看成是通风出口，并且损失系数为 1。

压力阶跃可以是常数，或者是流动方向垂直方向上速度分量的函数形式。

7. 压力出口边界条件介绍

压力出口边界条件给定出口的静压（表压）。该边界条件只能用于模拟亚音速流动。如果当地速度已经超过音速，则该压力在计算过程中就不采用了。压力根据内部流动计算结果给定，其他量都是根据内部流动外推出边界条件。该边界条件可以处理出口有回流问题，合理的给定出口回流条件，有利于解决有回流出口问题的收敛困难问题。

出口回流条件需要给定：回流总温（如果有能量方程），湍流参数（湍流计算），回流组分质量分数（有限速率模型模拟组分输运），混合物质量分数及其方差（PDF 计算燃烧）。如果有回流出现，给的表压将视为总压，所以不必给出回流压力。回流的流动方向与出口边界垂直。

在出口压力边界条件给定中，需要给定出口静压（表压）。当然，该压力只用于亚音速计算。如果局部变成超音速，则根据前面来流条件外推出口边界条件。需要特别指出的是，这里的压力是相对于前面给定的工作压力。

FLUENT 给出了径向平衡出口边界条件供大家选择（适用于三维和轴对称有旋流动）。这时，只有在半径很小的区域使用给定的静压边界条件，其他地方假定径向速度可以忽略而计算得到，压力梯度为

$$\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{\rho v_\theta^2}{r} \tag{2-4}$$

式中　r——径向方向；

v_θ——周向旋转速度，单位为 m/s。

即使周向旋转速度为零，该边界条件也可以用。

8. 压力远场边界条件介绍

如果已知自由流的静压和马赫数，就可以利用 FLUENT 提供的压力远场边界条件来模拟该类问题了。该边界条件只适合用理想气体定律计算密度的问题，而不能用于其他问题。为了满足压力远场条件，需要把边界放到我们关心区域足够远的地方。

压力远场边界条件需要给定边界静压、温度及马赫数，可以是亚音速、跨音速或者超音速，并且需要给定流动方向，如果有必要，还必须给定湍流量等参数。

9. 自由流出边界条件介绍

如果在求解问题前不知道流出口的压力或者速度，这时可以选择自由流出边界条件。这类边界条件的特点是不需要给定出口条件（除非是计算分离质量流，辐射换热或者包括颗粒稀疏相问题）。出口条件都是通过 FLUENT 内部计算得到的，但并不是所有问题都适合，如下列情况，就不能用自由流出边界条件：

1）包含压力进口条件。

2）可压缩流动问题。

3）有密度变化的非稳定流动问题（即使是不可压缩流动）。

用流出边界条件时，所有变量在出口处的扩散通量都为零，即出口平面从前面的结果计算得到，并且对上游没有影响。计算时，如果出口截面通道大小没有变化，采用完全发展流动假设流动速度、温度等分布在流动方向上无变化。当然，在径向允许有梯度存在，只是假定在垂直出口面方向上扩散通量为零。

10. 出口通风边界条件介绍

出口通风边界条件用于模拟出口通风情况，并给定一个损失系数、环境（出口）压力和温度。

出口通风边界条件需要给定如下参数：静压、回流条件、辐射参数、离散相边界条件和损失系数。

出口通风边界条件的压力损失也按式（2-3）计算。

11. 排气扇边界条件介绍

排气扇边界条件用于模拟外部排气扇，给定一个压升和环境压力。

通常假定排气扇无限薄，并且流体通过排气扇的压升是流体速度的函数。

12. 壁面边界条件介绍

对于粘性流动问题，FLUENT 默认设置是壁面无滑移条件，读者可以指定壁面切向速度分量（壁面平移或者旋转运动时），也可以给出壁面切应力，从而模拟壁面滑移。根据当地流动情况，可以计算壁面切应力和与流体换热情况。壁面热边界条件包括固定热通量、固定温度、对流换热系数、外部辐射换热与对流换热等。

对于壁面条件下换热计算边界条件，对流换热系数是根据当地流场计算得到的（湍流水平，温度和速度曲线）。

在粘性流动中，壁面采用无滑移边界条件。可以指定剪切应力和热边界条件等。壁面换热边界条件的设置如图 2-81 所示。对一维或薄壳导热计算，可以指定壁面材料和厚度。

对湍流可以指定壁面粗糙度，基于局部流场的壁面剪切应力和传热。另外，壁面也可以设置平移或旋转速度。

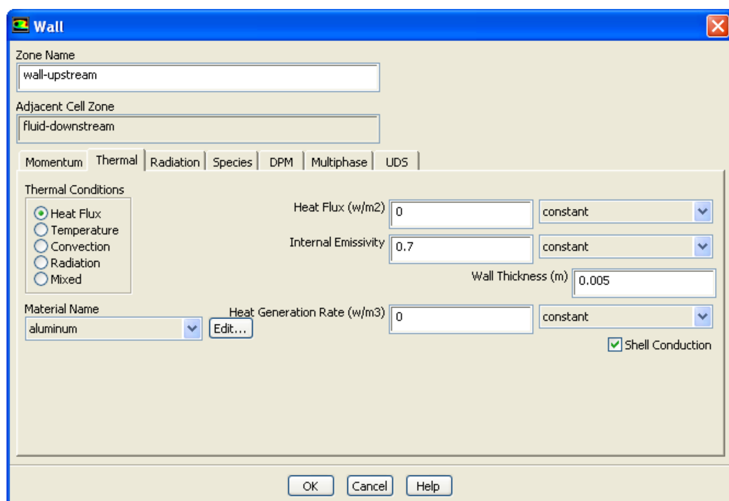


图 2-81　壁面换热边界条件的设置

13. 对称边界条件介绍

对称边界条件应用于计算的物理区域，或者流动及传热场是对称的情况。在对称轴或者中间平面上没有对流通量，因此垂直于对称轴或者中间平面的速度分量为零。在对称轴或中间平面上没有扩散通量，即垂直方向上的梯度为零。因此，在对称边界上，垂直边界的速度分量为零，任何量的梯度为零。

计算中不需要给定任何参数，只需要确定合理的对称位置，该边界条件可用于粘性流中的运动边界处理。

14. 周期性边界条件介绍

如果我们关心的流动，其几何边界的流动和换热是周期性重复的，则可以采用周期性边界条件。FLUENT 提供了两种类型：一种是流体经过周期性重复后没有压降（Cyclic）；另一种有压降（Periodic）。叶轮机械的性能计算采用的单流道模型，就是采用周期性边界条件，以减少全局网格量。

15. 内部边界面介绍

内部边界面只在单元的面上定义。一般内部边界面的厚度为零，内部边界面上的变量可以突变。内部边界面用以实现风扇、散热器和多孔突变区域等物理模型。

2.4.5 FLUENT 的求解器

1. FLUENT 求解器的种类

FLUENT 中有压力基和密度基两种求解器，如图 2−82 所示。

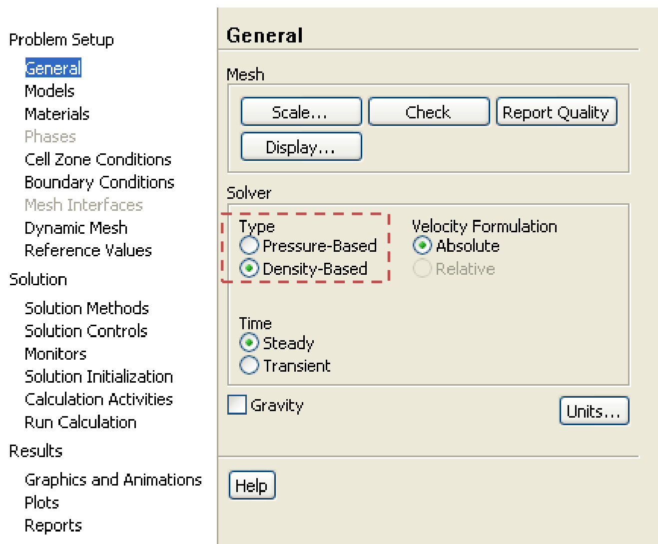


图 2−82　压力基和密度基求解器

压力基求解器以动量和压力为基本变量，通过连续性方程导出压力和速度的耦合算法。压力基求解器包括分离求解器和耦合求解器两种算法。其中，分离求解器通过压力修正和动量方程顺序求解；耦合求解器（PBCS）通过压力和动量方程同时求解。

压力基求解器的应用范围覆盖从低压不可压缩流到高速压缩流，需要的内存少，求解过

程灵活。压力基耦合求解器适用于大多数单相流，比分离求解器性能更好；不能用于多相流（欧拉）、周期质量流和非迭代时间推进法（NITA）；比分离求解器多用 1.5～2 倍内存。

密度基耦合求解器（DBCS）以矢量方式求解连续性方程、动量方程、能量方程和组分方程，通过状态方程得到压力，而其他标量方程则按照分离方式求解。DBCS 可以显式或隐式方式求解。其中，隐式使用高斯赛德尔方法求解所有变量；显式使用多步龙格库塔显式时间积分法。



密度基耦合求解器适用于密度、能量、动量、组分间强耦合的现象，如伴有燃烧的高速可压缩流动，超高音速流动和激波干扰等。隐式方法一般优于显式，因为其对时间步有严格的限制。显式方法一般用于流动时间尺度和声学时间尺度相当的情况，如高马赫激波的传播等。

2. FLUENT 求解器的优点

（1）网格构造信息

FLUENT 的网格文件中存储了所有的网格信息：节点坐标、连接关系和域的定义。

和几何定义类似，网格定义如下：

✧ Node 边的交叉点 / 网格顶点。
✧ Edge 面的边（由两个节点定义）。
✧ Face 单元的边界，由一组边定义。
✧ Cell 域离散的控制体。
✧ Zone 一系列节点、边、面或单元的集合。

计算域由以上所有的信息组成。对纯流动问题，域只包括流体域；对共轭换热问题或流固耦合问题，域还会包含固体域。

边界条件设置在面上，材料属性和源项设置在单元上。

（2）网格的重新排序和编辑

通过单击[Grid]>[Reorder]>[Domain]或[Grid]>[Reorder]>[Zones]，FLUENT 允许用户可以对整个域（Domain）或指定的域（Zones）进行排序。网格的重新排序能使邻近的单元排在一起，可以提高内存读取效率，减少计算带宽。

在网格菜单中，也可以对面/体做如下编辑：分割域、合并域；通过合并重合的面或节点来融合域；平移、旋转、镜像面或体域；拉伸面形成体域；替换体域或删除体域；激活体域或冻结体域。

（3）多面体网格转换

FLUENT GUI 可以把四面体或混合网格转换为多面体网格。其优势在于：可以提高网格质量，减少单元数量；用户可以控制转换过程。但 FLUENT GUI 不支持自适应，不能再次转换，目前还不能支持光顺、交换、合并和拉伸等网格编辑工具。

（4）分布文件和求解结果插值

FLUENT 允许通过分布文件和数据插值对选择的变量在面或体上插值。例如，实验数据或者其他 FLUENT 计算结果里的入口速度分布，或者粗网格的计算结果插值到密网格上。

分布文件是包含选择变量的点数据文件，可以通过 FLUENT 进程读/写。

如图 2-83 所示，通过单击[File]>[Write]>[Profile...]，可以将计算模型各边界条件上的变

量输出为分布文件。

插值数据文件包括选择变量的离散数据，可以在 FLUETN 中读入和写出。

如图 2-84 所示，通过单击[File]>[Interpolate...]，可以将计算模型各边界条件上的变量输出为插值数据文件。

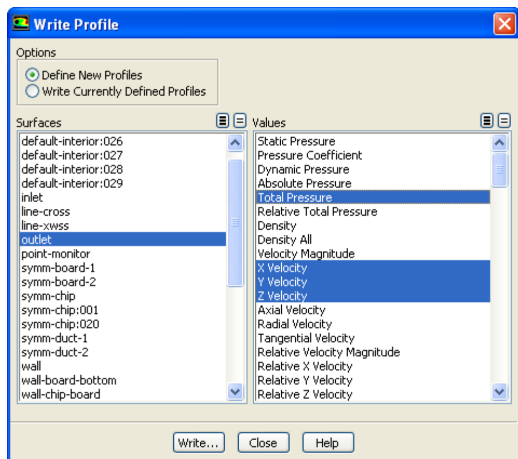


图 2-83　输出分布文件

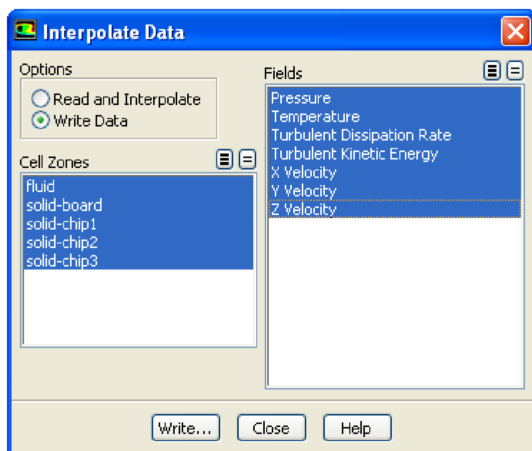


图 2-84　输出插值数据文件

（5）网格自适应

网格自适应是求解过程中根据需要加密或粗化网格的技术。其操作方法是把满足条件的网格标注并存储起来。如需要，可以显示或更改这些网格，通过“Adapt”命令对这些网格进行自适应。

网格自适应的过程为：所有变量的梯度或等值线→边界上的所有单元→指定形状里的所有单元→网格体积变化率→近壁面网格的 y+。

实现自适应的技巧包括合并注册的适应区；显示适应函数的等值线；显示标注的适应网格；给出基于网格尺寸和数量的适应限制。

以导弹的超音速流场为例，可以对压力梯度大的区域自适应网格，以更好地捕捉通过激波的压力突变。通过比较图 2-85 和图 2-86 可知，基于求解结果的网格自适应允许更好地解析弓形激波和膨胀波。观看过火箭发射过程的读者，应该对图 2-86 的计算结果更认可。

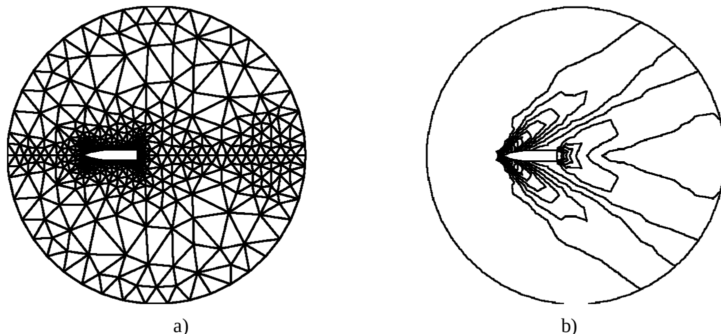
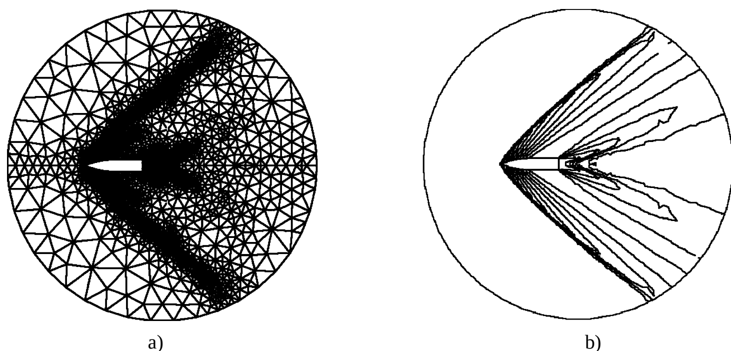


图 2-85　网格自适应前

a) 初始网格　b) 压力分布等值线图



a) b)

图 2-86 网格自适应后

a) 自适应网格 b) 压力分布等值线图

2.4.6 瞬态 CFD 分析

1. 瞬态流动的根源

（1）自然发生的瞬态流动

由于流体中不稳定性的增长或者非平衡的初场引发的瞬态流动，如自然对流、湍流涡和流动波（重力波、激波）等。

（2）强迫瞬态流动

时间平均的边界条件，源项引起的瞬态流动，如喷嘴的脉冲、旋转机械的动静干涉等。

2. 模拟瞬态流场的方法

1）稳态解：流场不再随时间变化。

2）时间周期解：流场形态随时间脉动重复出现。

目标可以简化为分析预定时间间隔的流动，如自由表面流和移动的激波等。

同时应抽取关心的变量：特征频率（如斯德鲁哈尔数）、时间平均或/RMS 值、时间相关的参数（如热固体的冷却时间、污染物的停留时间等）和特殊数据（快速傅里叶变换）等。

瞬态流动的模拟流程一般为

1）激活瞬态求解器。

2）设置物理模型和边界条件，允许通过 UDF 或分布文件设置瞬态边界条件。

3）指定初场，最好用有物理意义的初场，如稳态流场。

4）设置求解器和监测器。

5）设置动画和数据输出选择。

6）选择时间步和最大迭代次数。

7）设定时间步数。

8）计算。

在“General”菜单下选择“Transient”项，即可激活瞬态求解器，如图 2-87 所示。

开始执行迭代前，需要设置附加的控制：求解器设置、动画、数据输出/自动保存选项。

3. 选择瞬态时间步长

选择瞬态时间步长的方法大致如下：

在“Run Calculation”项中设置时间步长 Δt，Δt 必须小到能解析和时间相关的特征，确

定在每个时间步的最大迭代步内能收敛。指定零时间步时迭代，求解器会仅仅在当前时间步下收敛。对许多瞬态流动，PISO 格式有助于加速收敛。

由于 FLUENT 使用全隐格式，所以不存在用来确定 Δt 的稳定性判据。但是，为了正确模拟瞬态现象，有必要将 Δt 设定为比所模拟的系统最小时间常数小一个量级。通过观察每一个时间步中达到 FLUENT 收敛所需要的迭代次数，可以判断 Δt 的选择是否合理。每一个时间步的理想迭代次数是 10～20。如果 FLUENT 需要更多的迭代次数才能收敛，则说明时间步太大了。如果 FLUENT 在每个时间步中只需要很少的迭代次数，就可以增加 Δt。瞬态计算中最常见的问题就是计算启动后很快衰退。因此，最好在前 5～10 个时间步中选择较小的 Δt，然后在计算过程中逐渐增加 Δt。

对于周期性问题，周期性的最终解是不依赖起始阶段求解过程的时间步的。由于不关心流动开始阶段的精确解，因此在起始阶段可以定义“大”时间步长。以大时间步长开始计算，解能更快成为周期性。然而，当解达到周期性时，应减少时间步长，以获得精确解。如果采用二阶时间精度求解，那么在计算过程中改变时间步长会影响当前解的精度。以大时间步长开始计算，在求解过程中改变时间步长不应超过 20%。不能在最后几个周期改变时间步长，以确保解达到周期性状态。

4. 瞬态模型选择

在“Run Calculation”项中设置自适应时间步长（Time Step Size），如图 2-88 所示。FLUENT 软件基于局部截断误差自动调整时间步长，也可以通过 UDF 指定。在进行大涡模拟时，需要使用时间平均的统计。另外，在使用密度基求解器时，需要设定 Courant 数，以定义密度基显式求解器的全局时间步长，或密度基隐式求解器的伪时间步长（真实时间步长仍然必须在迭代面板中定义）。

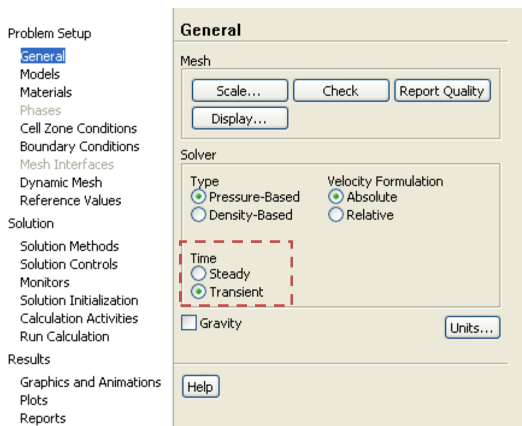


图 2-87　激活瞬态求解器

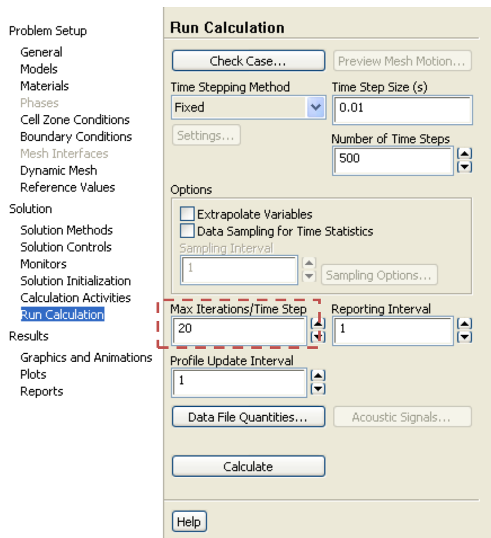


图 2-88　Max Iterations/Time Step

5. 执行迭代

通常的时间推进格式是迭代格式。求解器在当前时间步收敛，然后推进到下一个时间

步。当达到 Max Iterations/Time Step（见图 2-88）或满足收敛标准时，时间推进到下一步。各时间步依次收敛，直至达到总时间步。

执行迭代前，必须定义初始化：设置流体域的初始质量和流场的初始状态。

非迭代时间推进法（NITA）可更快速地计算时间。

瞬态模拟的求解技巧包括：

✧ 压力-速度耦合采用 PISO 格式，比标准 SIMPLE 格式更易收敛。
✧ 选择合适的时间步长，以至每个时间步长内能收敛 3 个量级。
✧ 每个时间步的迭代次数大约为 20 次，减少时间步长比增加每步的迭代次数要好。
✧ 精确的初场和边界条件一样重要，初场一定要符合真实物理条件。
✧ 在计算前定义希望得到的动画。

2.4.7 其他应注意的项

1. 收敛性保证

计算收敛时应该满足：

1）所有离散的守恒方程（如动量、能量等）在所有的单元中满足指定的误差或者结果随计算不再改变。

2）全局的质量、动量、能量和标量达到平衡。

使用残差历史曲线来监测收敛时：

1）一般地，残差下降 3 个量级表示至少达到定性的收敛，流场的主要特征已经形成。

2）压力基求解器的能量残差应下降到 10^{-6}。

3）组分残差应下降到 10^{-5}。

如果监测到求解已经收敛，但计算结果还在改变，或还有大的质量/热量不平衡，这表示求解还未收敛。此时，用户应该减小残差标准或关闭监测残差的窗口，继续迭代，直至计算收敛。

如图 2-89 所示，在“Convergence Criterion”项中选择“None”，即可关闭监测残差的窗口。

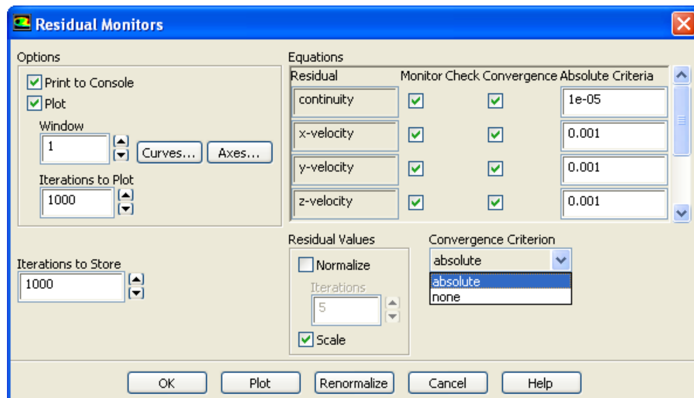


图 2-89 关闭监测残差的窗口

对一些病态问题，差质量的网格或不合适的求解设置，都可能出现数值不稳定性。一般表现为残差曲线上扬（发散）或不下降，如图 2-90 所示。



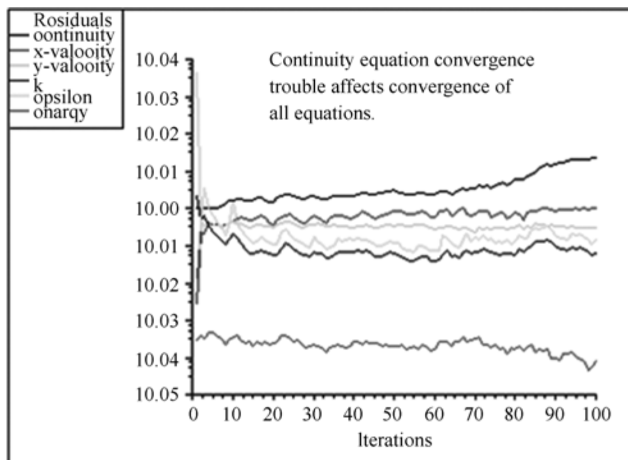


图 2-90　残差曲线上扬

发散意味着守恒方程的不平衡增加，没收敛的结果会误导使用者。

解决方法包括：

✧ 确保问题是物理合理的。

✧ 用一阶离散格式计算一个初场。

✧ 对压力基求解器，减少发散方程的松弛因子。松弛因子选项如图 2-91 所示。

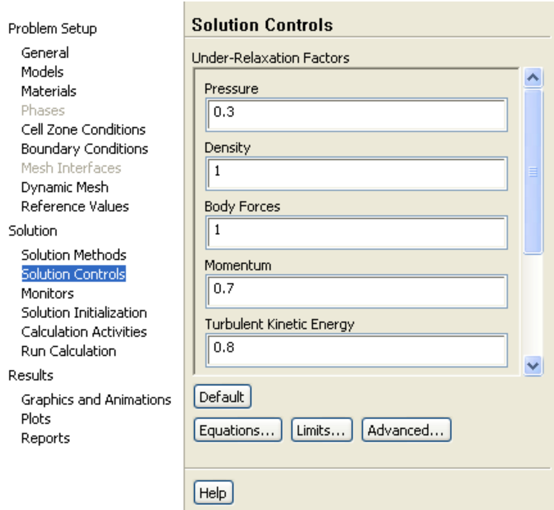


图 2-91　松弛因子选项

✧ 对密度基求解器，减少 Courant 数。

✧ 重新生成网格或加密质量差的网格。

注意：网格自适应不能提高扭曲度大的网格质量。

2. Courant number 的设置方法

在 FLUENT 软件中，用 Courant number 来调节计算的稳定性与收敛性。对密度基求解器，即使稳态问题，也存在瞬态项，因此需要用 Courant number（库朗数）定义时间步长。对显式求解器，由于稳定性约束限制了最大库朗数，一般要求不能超过 2（默认为 1）；有收

敛困难时减少库朗数。对隐式求解器，库朗数没有稳定性约束限制，默认值为 5。一般情况下，计算初期可降低库朗数，待收敛性较好时，可放大此值，加速收敛。

一般来说，随着库朗数从小到大的变化，收敛速度逐渐加快，但是稳定性逐渐降低。在计算过程中，建议把库朗数从小开始设置，看迭代残差的收敛情况，如果收敛速度较慢而且比较稳定，可以适当增加库朗数，根据自己具体的问题找出一个比较合适的库朗数，让收敛速度能够足够快，而且能够保持它的稳定性。

库朗数实际上是时间步长和空间步长的相对关系，系统自动减小 Courant 数，这种情况一般出现在存在尖锐外形的计算域，当局部的流速过大或者压差过大时出错，把局部的网格加密，再试一下。

3. 湍流强度的设置方法

在 FLUENT 中设置边界条件的湍流强度 I 时，可依据式（2−5）计算。雷诺数越小，湍流强度越大，如雷诺数 Re 为 50000 时，湍流强度为 4%，Re 为 5000 时，湍流强度为 5.8%。

$$I = 0.16(Re)^{-1/8} \tag{2-5}$$

Re 数计算时用的是平均速度，Re 越大，说明平均速度越大，即紊流强度的分母越大，紊流强度就越小。

4. 网格无关解

当加密网格，结果不再改变时，称为网格无关解。

得到网格无关解的过程一般为

1）生成一个新的、更密的网格。具体做法是：回到网格阶段，手动调整网格；或创建自适应网格，插值原结果到密网格上。FLUENT 提供动态网格自适应，会根据用户定义的标准自动改变网格。

2）继续计算，直至收敛。

3）比较两次结果的解，如两次结果的差别满足要求，则视为网格无关解。

4）如有必要，重复以上过程。

5. FLUENT Journals

FLUENT 可以使用 journal 文件以批处理方式运行。journal 是包括 TUI 命令的文本文件。

FLUENT TUI 允许命令的缩写，如

✧ ls：列表工作目录下的文件。

✧ rcd：读入 case 和 data 文件。

✧ wcd：写 case 和 data 文件。

✧ rc/wc：读/写 case 文件。

✧ rd/wd：读/写 data 文件。

✧ it：迭代。

批处理文件中的 TUI 命令可以在非交互模式下自动运行。

TUI 命令 file/read-bc 和 file/write-bc 可以用来读写 FLUENT 中的设置到一个文件中。

下面是一段 FLUENT 的 Journals 代码。

```
; Read case file
rc example.cas.gz
```

```
; Initialize the solution
/solve/initialize/initialize-flow
; Calculate 50 iterations
it 50
; Write data file
wd example50.dat.gz
; Calculate another 50 iterations
it 50
; Write another data file
wd example100.dat.gz
; Exit FLUENT
exit
yes
```

2.5　CFX 的用户界面

如图 2-92 所示，选择[开始]>[所有程序]>[ANSYS 13.0]>[Fluid Dynamics]>[CFX]菜单命令，启动 CFX 软件。

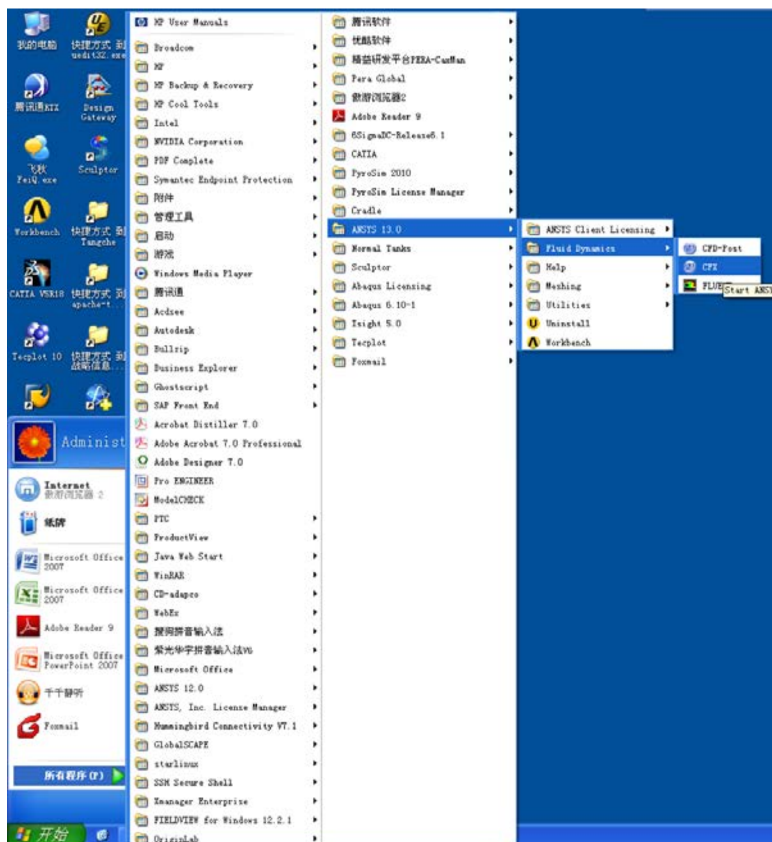


图 2-92　启动 CFX

打开“ANSYS CFX-13.0 Launcher”对话框，如图 2-93 所示。其中，“Working

Directory”栏中所指为文件存储地址。

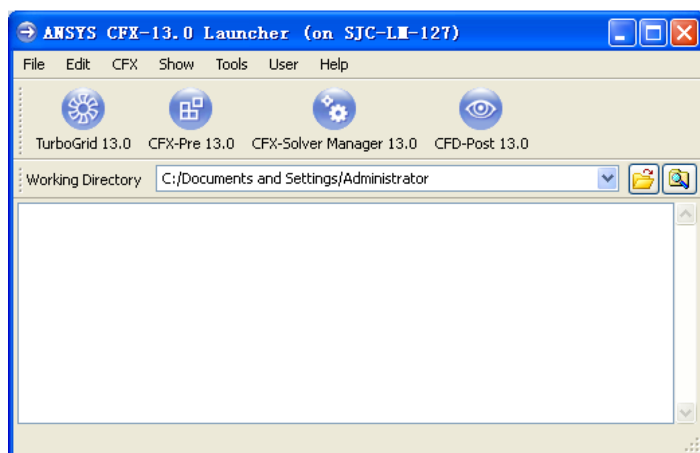


图 2-93 “ANSYS CFX-13.0 Launcher”对话框

单击 CFX-Pre 13.0 按钮，进入 CFX-Pre 模块主界面，如图 2-94 所示。在该模块中，可对模型进行边界条件及求解条件设置。

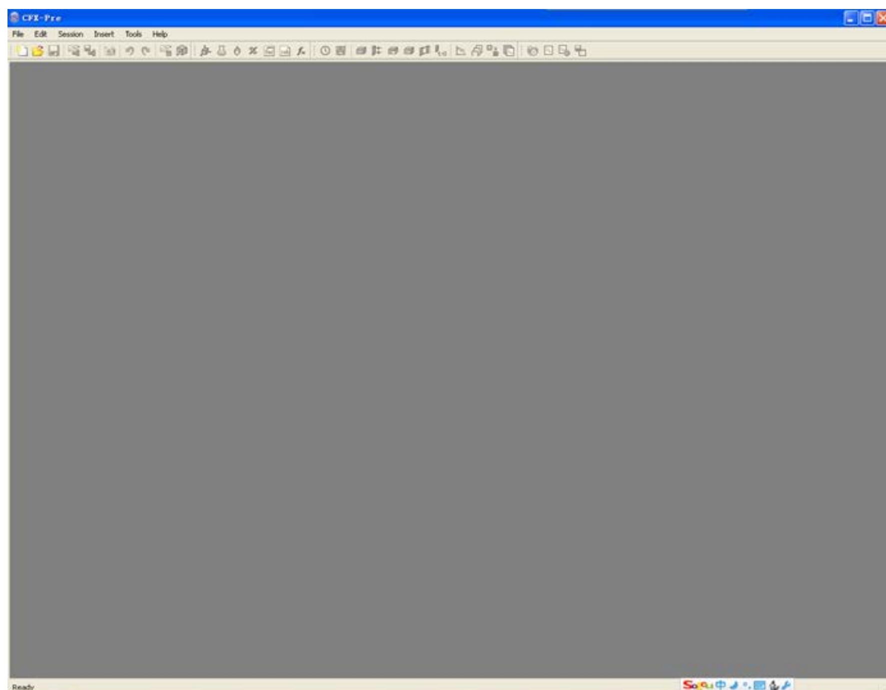


图 2-94 CFX-Pre 模块主界面

单击 CFX-Solver Manager 13.0 按钮，进入 CFX-Solver 模块主界面，如图 2-95 所示。在该模块中，可对模型进行求解并设置监测点和监测曲线，进行监控。

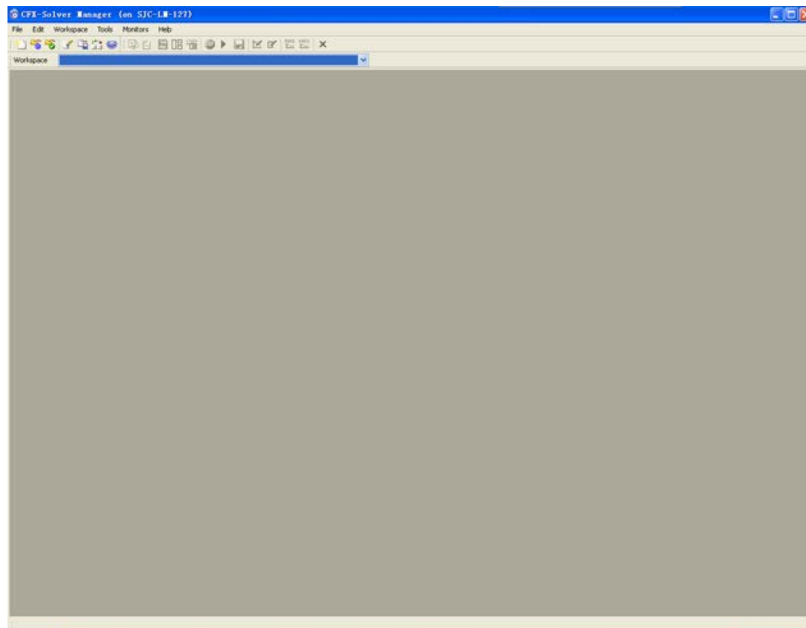


图 2-95　CFX-Solver 模块主界面

单击 按钮，进入 CFX-Post 模块主界面，如图 2-96 所示。在该模块中，可对模型进行计算结果的后处理及可视化显示。

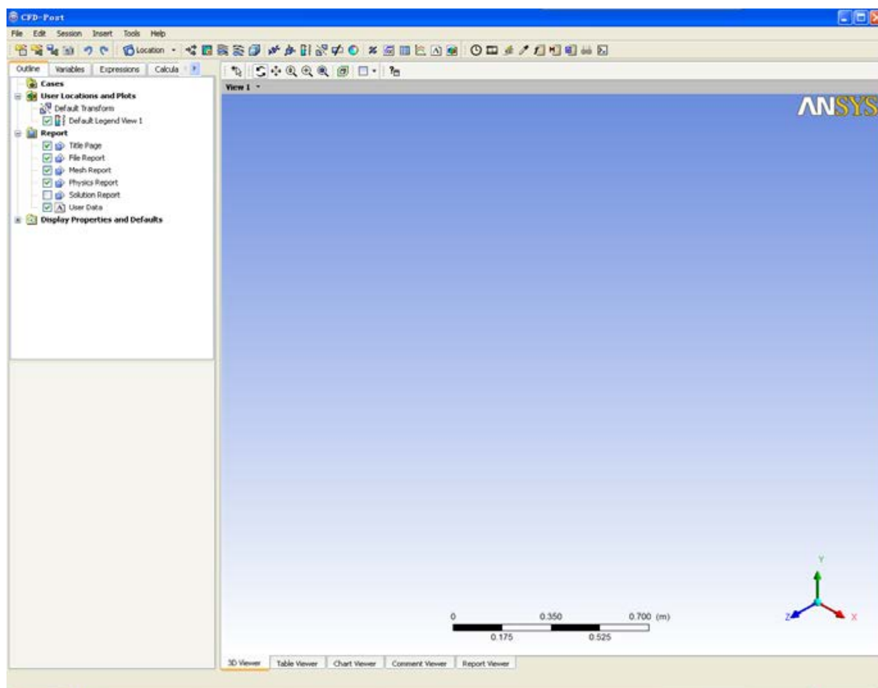


图 2-96　CFX-Post 模块主界面

CFX 软件的软件界面较简单，具体描述详见第 6 章。

2.6 CFX 的求解技巧

本章第 2.4 节已对 FLUENT 的求解技巧进行了讲解。由于 CFX 软件的求解技巧与 FLUENT 大致相同，故此处仅列出主要求解功能。

- 二维或三维流动
- 旋转坐标系
- 定常或非定常流动
- 不可压或可压流动
- 多重参考坐标系
- 浮力驱动流
- 非牛顿流
  - Bingham
  - Bird-Carreau
  - Cross
  - Herschel-Bulkley
  - Power Law 模型
  - User Fortran
- 湍流
  - $k-\varepsilon$ 模型
  - 低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型
  - 低雷诺数 Wilcox 模型
  - 低雷诺数 Menter 修正 k-ω 模型
  - RNG $k-\varepsilon$ 模型
  - 代数雷诺应力模型
  - 微分雷诺应力模型
  - 微分雷诺通量模型
  - SST（Shear Stress Transport）模型
  - 大涡模型
- 化学反应动力学
- 多孔介质
- 多组分流体
- 多相流分析
- 燃烧分析
- 自由表面
- 传热
  - 粘性加热
  - 对流
  - 传导
  - 辐射传热
    - Monte Carlo 法
    - Discrete Transfer 法
    - P1 法
    - Surface-to-Surface 法
    - Gibbs 法
  - 流固耦合传热
- 数值方法
  - 基于有限元的有限体积方法
  - 有限体积法
  - 全隐式的耦合算法
  - SIMPLE 和 PISO 耦合算法
  - 线性的或二阶时间差分
    - 混合差分
    - 迎风格式
    - 高阶迎风格式
    - QUICK 格式
    - CONDIF 格式
    - TVD/MUSCL 格式
    - CCCT 格式
- 并行计算

2.7 CFD-Post 与计算结果后处理

FLUENT 结果有以下两种后处理方式。

1）FLUENT 后处理工具：集成在 FLUENT 软件中的历史遗留产品。

2）ANSYS CFD-Post：ANSYS CFD 产品的新一代后处理工具，可以单独运行或在 Workbench 环境下运行。

由于 ANSYS 13.0 的下一个版本会将 FLUENT 和 CFX 等流体软件进行界面归一化的设计，所以本节主要讲述 CFD-Post 的主要功能。ANSYS CFD-Post 软件包括了分析 CFD 结果的许多工具，如等值面、速度矢量图、等值线图、流线图/迹线图、二维曲线图和动画等，可以表达包括任意用户定义的变量（通过流场函数定义或 UDF 定义）。

1. GUI 布局

CFD-Post 的用户界面（即 GUI 布局）如图 2−97 所示。

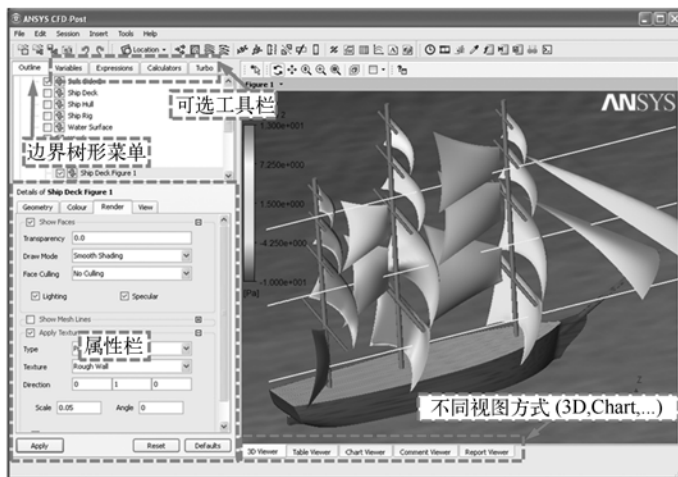


图 2−97　CFD-Post 的用户界面

2. CFD-Post 的一般流程

1）确定位置。域、子域、边界和网格区域都是位置，在这些位置上可以抽取数据和产生各种图形。

2）如需要，可创建变量/表达式。

3）在位置上生成定量和定性的数据。

4）生成报告。

3. 创建位置

1）在 Insert 菜单或工具栏中的 Location 项创建位置，如图 2−98 所示。

控制显示的按钮

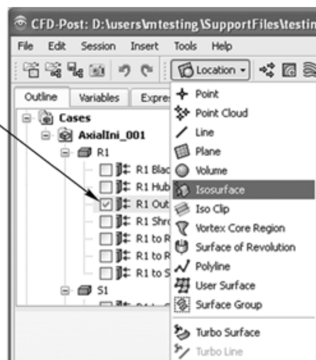


图 2−98　创建位置

2）创建好的位置显示在 Outline 树中。双击位置对象，可以通过其属性栏进行编辑，右键单击该截面，可以进行复制或删除。用户创建的位置都罗列在“User Locations and Plots”菜单下。

3）位置类型。

① 面（Planes）。如图 2-99 所示，可以通过“Method”项中的 XY Plane，Point and Normal 等方式创建面。在求解域里，可以创建圆或矩形。

② 点（Point）。如图 2-100 所示，可以通过 XYZ 方式（坐标系创建，通过鼠标拾取）、节点数（Node Number，一些求解器错误产生的节点数信息）、最大/最小变量（标明最大/最小变量出现的地方）等方式创建点。

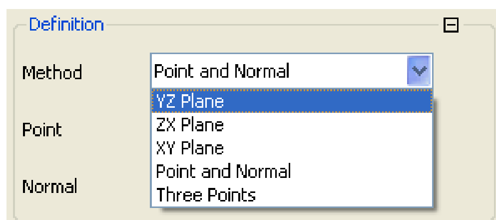


图 2-99　创建面的方式

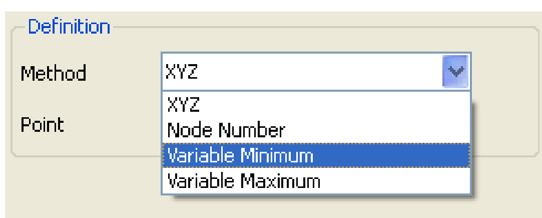


图 2-100　创建点的方式

③ 点云（Point Cloud）。如图 2-101 所示，可以通过 Equally Spaced、Rectangular Grid 和 Vertex 等方式创建点云。

④ 线（Lines）。两点之间的直线经常用于 XY 图表制作。

⑤ 体（Volumes）。可通过 Surface 构建，由选择的所有面构建而成，用于网格检查。

也可基于变量的等值体（Isovolume），如图 2-102 所示。

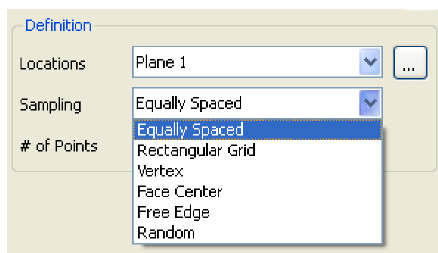


图 2-101　创建点云的方式

⑥ 等值面。等值面指某指定变量的面。

此外，还有涡核心区（Vortex Core Region）、旋转面（Surface of Revolution，包括柱面（Cylinder），锥面（Cone），盘面（Disc）和球面（Sphere）等）和用户自定义面（User Surface）等。

4. 变量按钮

变量按钮用于显示所有可用变量的信息，如图 2-103 所示。

1）Derived variables：通过 CFD-Post 计算得到，这些量不包括在结果文件中。

2）Geometric variables：X，Y，Z，Normals，mesh quality data。

3）Solution variables：来自结果文件。

4）User Defined variables：创建新的变量，也可以用表达式代替变量。

在“Variables”Tab 页中，右键选择[Solution]>[New…]，可创建新的变量，如图 2-103 所示。

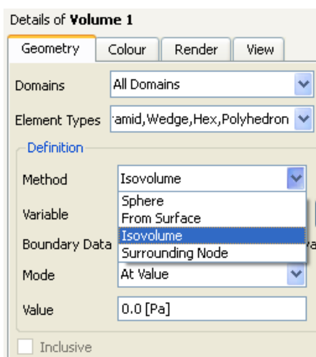


图 2-102　创建体的方式

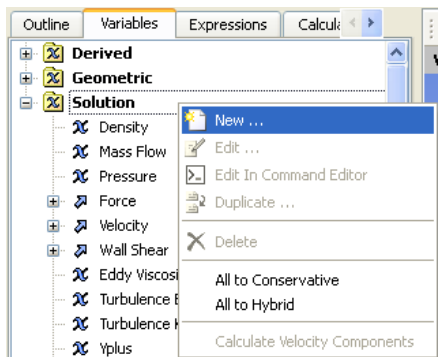


图 2-103　创建新的变量

5）CFX 软件的变量属性。

CFX 软件中，计算结果对应的变量属性可以在 Hybrid（混合变量）和 Conservative（守恒变量）两种变量显示方式之间切换，如图 2-104 所示。

混合变量和守恒变量的区别是：守恒变量值为控制体积值，而混合变量值是指定边界条件上的值。

CFX-Solver 软件是基于有限体积法，有限体积法是基于网格构建的，而并非等同于网格。网格节点位于控制体的中心，但计算数据是存储于节点的，而非“平均的”存储于控制体。因此，几乎所有 wall 边界上的半个控制体都有非零的速度，这些非零的速度存储在壁面的节点上，但是理论上壁面上的速度值应该为零。

图 2-105 所示为同一截面速度云图的两种表达方式。从图片观察的角度，ANSYS CFD-Post 采用混合（Hybrid）值为默认值，这个值不会出现壁面上速度非零的情况。

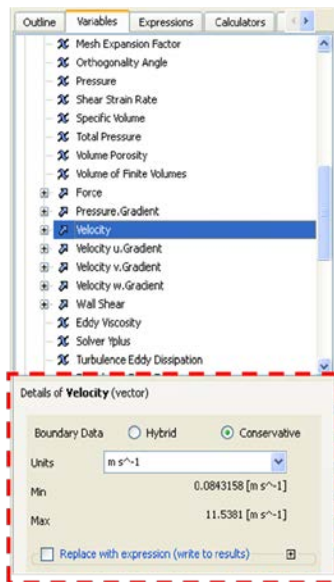


图 2-104　变量属性

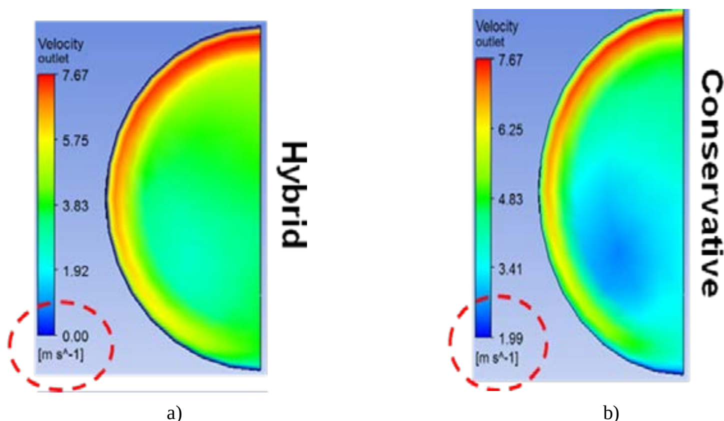


图 2-105　同一截面速度云图的两种表达方式

a) Hybrid　b) Conservative

大多数情况下，不用选择 Hybrid 或 Conservative，CFD-Post 的默认选项往往正确。采用定义变量，默认为 Conservative 值。

5. 表达式按钮

Expressions 按钮显示全部存在的表达式，也可以在表达式上单击右键> New，创建新的表达式，如图 2-106 所示。对新的表达式，在 Definition 下进行细节定义。

6. 计算器按钮

计算器按钮主要包括以下工具，如图 2-107 所示。

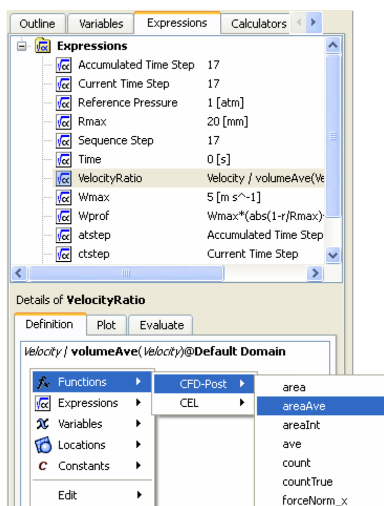


图 2-106　创建新的表达式

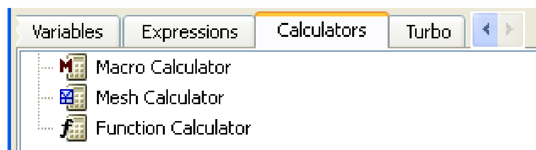


图 2-107　计算器按钮

（1）函数计算器

函数计算器（Function Calculator）用于抽取计算结果的工程数据，这些函数也可用于创建表达式，如图 2-108 所示。

（2）宏计算器

宏计算器（Macro Calculator）用于计算预先定义好的宏，如图 2-109 所示。

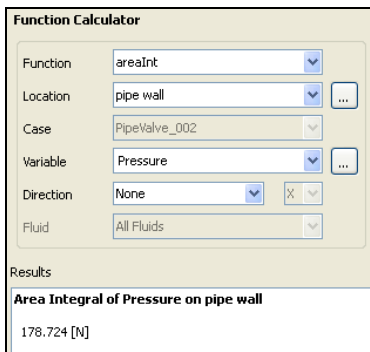


图 2-108　函数计算器

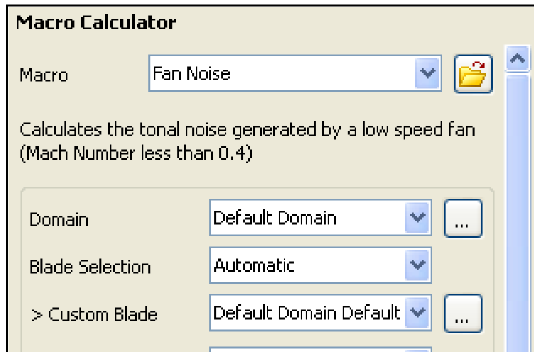


图 2-109　宏计算器

（3）网格质量计算器

网格质量计算器（Mesh Calculator）用于计算网格质量，如图 2-110 所示。

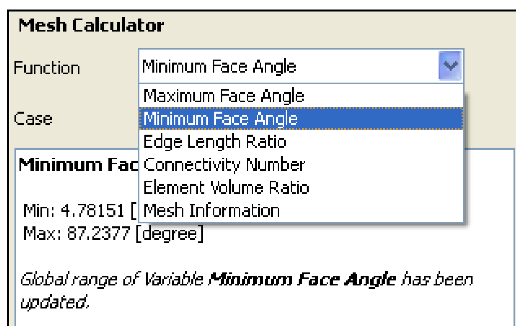


图 2-110　网格质量计算器

7. Turbo 按钮

Turbo 按钮包含透平机械计算的后处理工具，如图 2-111 所示。利用“Turbo”Tab 页，可以生成大量表格（Tables）和图表（Charts）。

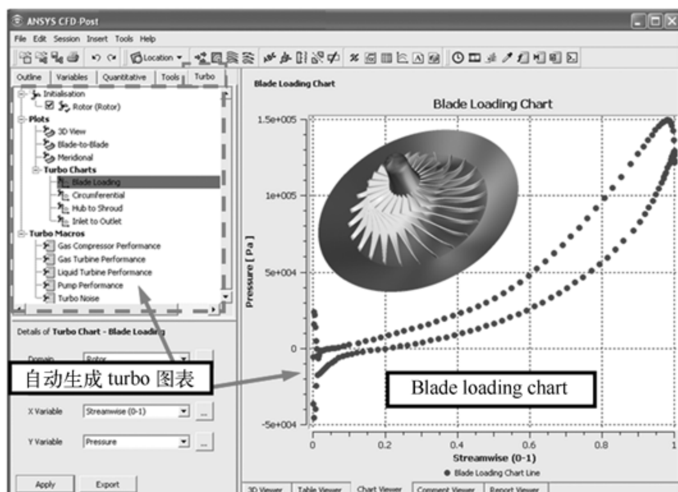


图 2-111　“Turbo”Tab 页

8. 报告生成

CFD-Post 具有报告生成工具，允许通过定制报告的方式进行快速的报告生成。基于结果文件的类型，可以自动选择报告模板。

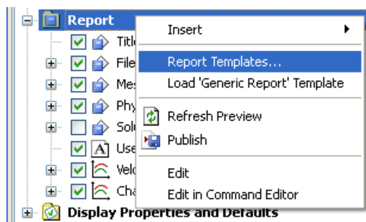


图 2-112　选择模板

用户可以在 Report 选项上右键进行模板选择，也可以自己创建模板或修改已存在的模板，如图 2-112 所示。

比如，加入公司的 logo，加入 Charts、Tables、Plots 等到报告中。

如图 2-113 所示，通过勾选方式，控制报告里显示的内容。各显示内容可通过双击方式进行编辑。

如图 2-114 所示，Table 和 Chart 可以自动加入到报告里，其他项目需要手动添加进去。

如图 2-115 所示，创建图片时，有一个选项为 Make copies of objects。

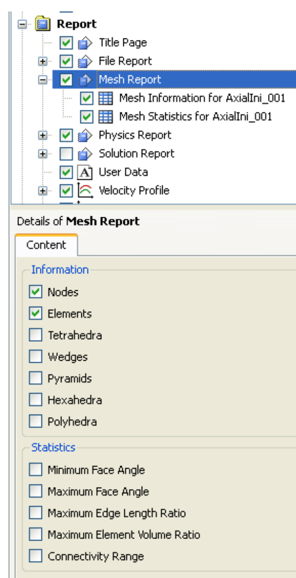


图 2-113　控制报告里显示的内容

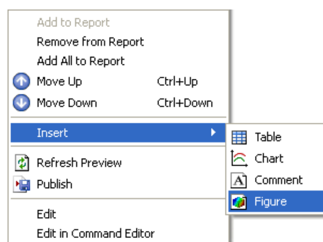


图 2-114　插入图表

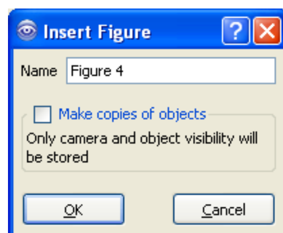


图 2-115　Make copies of objects 选项

这个选项没有勾选上，仅仅图片里显示的内容存储于 figure 中。所以，当全局目标改变，该图片也会发生改变，这用于需要图片自动更新的情况。

如勾选该选项，图片里当前的内容存储在 figure 中，并显示在目录树上。全局改变不会导致 figure 的改变。

报告的生成方法是：单击视图区右下角的“Report Viewer”按钮，显示 report 内容，如图 2-116 所示。

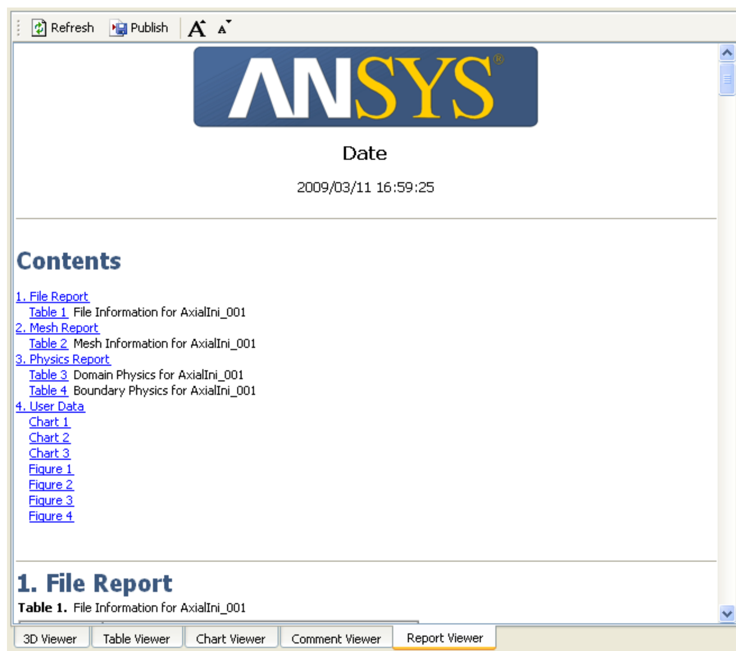


图 2-116　显示 report 内容

Report 的内容改变后，需要单击图 2-116 中左上角的“Refresh”按钮进行更新。

如图 2-117 所示，单击 Publish 按钮，将 Report 内容保存为 HTML 或 Text 格式，可以将所有 2D 图片显示为 3D 图片。

9. 动画生成

创建动画有 Quick 和 Keyframe 两种模式，如图 2-118 所示。

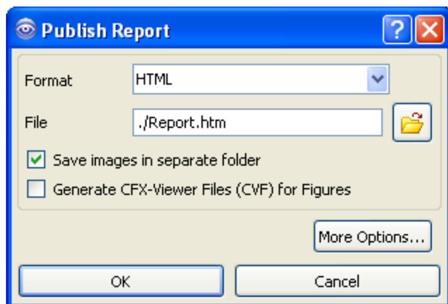


图 2-117 保存 report 内容

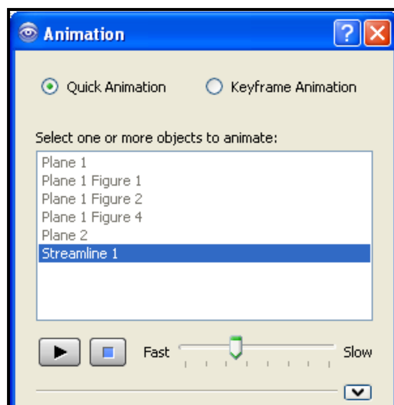


图 2-118 创建动画的两种模式

在 Quick 动画模式下，仅选取对象、单击 Play 键即可。主要的变量作为创建动画的对象，对动画效果控制有限。

Keyframe 模式对动画效果提供了大量的控制，如图 2-119 所示。其基本做法是：

✧ 创建一系列的影像储存于 Keyframes 中，代表一系列的不同状态（视图方向、显示的对象、时间步的选择等均可不一样）。

✧ 动画的创建至少需要两个 Keyframes（一个作为开始，一个作为结束）。

✧ 每个 Keyframe 之间加入“# of Frames”数目。

典型的 Keyframe 动画帧的设置方法为

1）利用时间步选择器（Timestep Selector）调整到第一个时间步。

2）创建必要的显示对象。

3）创建第一个 Keyframe。

4）导入最后一个 Timestep。

5）必要时，改变现实对象。

6）创建第二个 Keyframe。

7）选择第一个 Keyframe，并设置# of Frames。

8）# of Frames 指在第一个和第二个 Keyframes 之间。

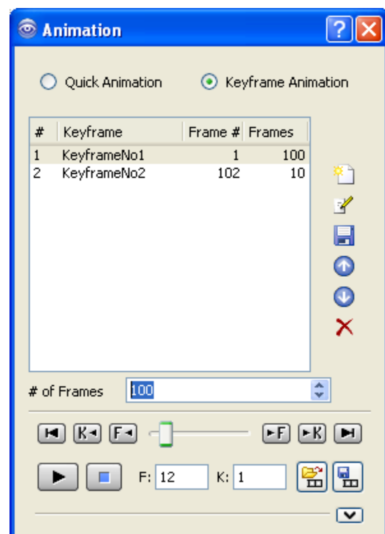


图 2-119 Keyframe 动画设置

9）如果有 100 timesteps，设置# of Frames=98，将有 100 个 frames（98 +第一个和最后一个），意味着 1frame/1timestep。

10）设置 Movie 选项。

11）回到第一个 Keyframe，并单击“Play”按钮。

2.8 FLUENT/CFX 软件在 Workbench 环境中的应用

启动 ANSYS Workbench，新建流体分析项目，在左侧项目树中将“Fluid Flow（FLUENT）”项拖至右侧项目栏空白区的方框中，或者直接双击“Fluid Flow（FLUENT）”，如图 2-120 所示。

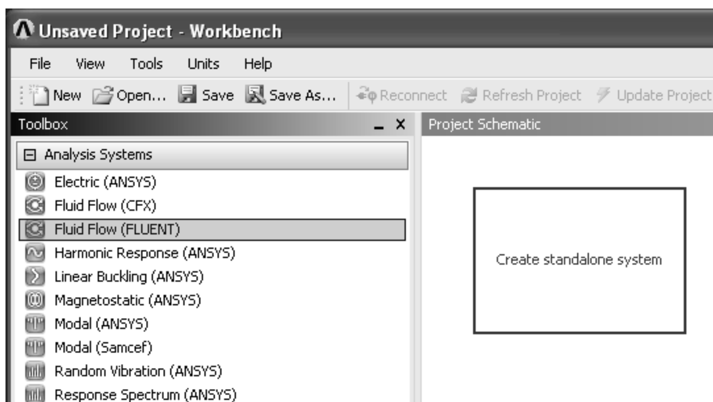


图 2-120 新建流体分析项目

在项目栏中生成“Fluid Flow（FLUENT）”项目，如图 2-121 所示。

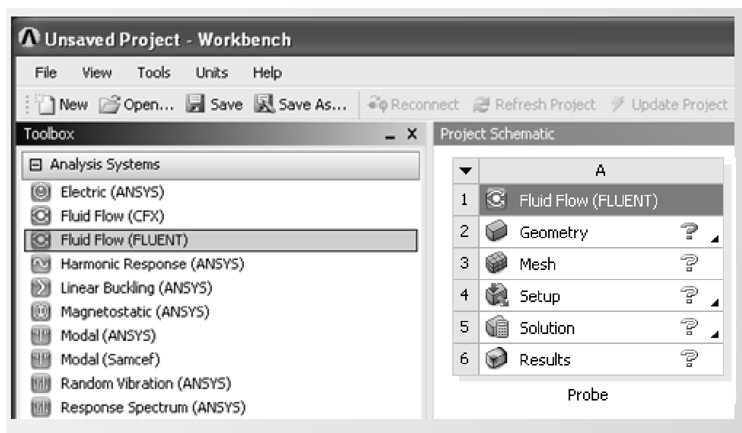


图 2-121 生成“Fluid Flow（FLUENT）”项目

依次双击或者单击鼠标右键选择 “Geometry”、“Mesh”、“Setup”、“Solution”和“Results”5 个模块，可分别对计算模型进行模型处理、网格划分处理、计算条件设置、求解

和计算结果后处理。

也可以采用对各个模块依次拖拽、连接的方法生成项目。CFX 软件在 Workbench 环境中的应用详见第 6 章。

2.9 用户自定义函数

标准的 FLUENT 界面并不能满足每个用户的需要，而使用用户自定义函数（User Defined Function，UDF）可以定制 FLUENT 代码来满足用户的特殊需要。用户自定义函数是用户自编的程序，它可以被动态地连接到 FLUENT 求解器上，来提高求解器性能。UDF 中可以使用标准 C 语言的库函数，或是 FLUENT 提供的预定义宏。通过预定义宏，可以实现从 FLUENT 求解中访问数据。编辑 UDF 代码有解释式（Interpreted）和编译式（Compiled）两种，即 UDF 使用时可以被当做解释函数或编译函数。

UDF 的主要功能包括：

1）定制边界条件；定义材料属性；定义表面和体积反应率；定义 FLUENT 输运方程中的源项；用户自定义标量输运方程（UDS）中的源项扩散率函数等。

2）在每次迭代的基础上调节计算值。

3）方案的初始化以及后处理功能的改善。

4）FLUENT 模型的改进（如离散项模型、多项混合物模型和离散发射辐射模型等）。

UDF 可执行的任务主要包括：

1）返回值。

2）修改自变量。

3）修改 FLUENT 变量（不能作为自变量传递）。

4）写信息到（或读取信息从）case 或 data 文件。

UDF 是一个在 C 语言基础上扩展了 FLUENT 特定功能后的编程接口，用户可以借助 UDF 使用 C 语言编写扩展 FLUENT 的程序代码，然后动态加载到 FLUENT 环境中参与计算。编写 UDF 时需要明确以下要求：

1）UDF 必须用 C 语言编写。

2）UDF 中必须包含 udf.h 头文件（可用#include 实现文件包含）。

3）UDF 必须使用预定义宏和包含在编译过程中的 FLUENT 提供的其他函数来定义。

4）由 UDF 传递给 FLUENT 求解器的参数值或从求解器返回到 UDF 的参数值，均采用国际单位制。

UDF 程序可以在任何 C 语言编辑器中编写、调试，然后保存为扩展名为.c 的文件。在 UDF 程序中，其开头部分必须显式地包含 udf.h 文件，该文件存放在 FLUENT 的安装目录下，相关函数需通过 DEFINE 宏进行定义，例如：

DEFINE_PROFILE(Outlet_y_pressure,thread,index)

定义了一个名为 Outlet_y_pressure 的函数，thread 和 index 是由 FLUENT 传递给该函数的两个参数，分别表示边界条件区域的代号和用于识别被存储的变量。在将 UDF 加载到 FLUENT 中后，它的名称（Outlet_y_ pressure）就出现在相应的边界条件对话框（如压力出

口对话框）中。

对 FLUENT 求解器的访问需要通过预定义宏进行。UDF 使用国际单位制向 FLUENT 传递数值。

应用 C 语言编辑器编写好 UDF 程序后，用户可以采用下列两种方法运行 UDF 程序：

1）应用 FLUENT 支持的外部 C 语言编译器对程序进行编译和链接。

2）直接作为解释型语言由 FLUENT 解释执行。

上述两种方式的程序结构和内容基本一致，唯一区别是可以调用的 C 语句不同，有些 C 语句在解释型程序中不能使用，如 goto 语句。编译型的 UDF 程序比解释型的 UDF 程序功能强大，但其占用的内存资源较多。解释型的程序也可以完全用来编译。一般来说，使用解释型的 UDF 程序就足够了。

下面给出了应用 DEFINE_PROFILE 宏定义的为求解器提供边界信息的代码：

```
/****************************************************/
/* udfexam.c */
/* UDF 程序——制定稳态压力进口边界条件 */
/****************************************************/
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(inlet_y_totalpressure, thread, index)
{
  real y[NP_NP]; /* 对应于位置矢量，real 相当于 double */
  real x;
  face_t f;
  begin_f_loop(f,thread) /*针对由 thread 所传入的所有单元面循环*/
  {
    F_CENTROID(y,f,thread);
    x=y[1];
    F_PROFILE(f,thread,index)=20-y*y/(0.0745*0.0745)*20;
  }
  end_f_loop(f,thread)
}
```

DEFINE_PROFILE 宏的第一个参数 inlet_y_totalpressure，用来标示 Pressure inlet 对话框中的函数，该名称可由用户任意指定。

将所编辑的 UDF 源程序在 FLUENT 中运行，需要遵循以下基本步骤：

1）明确所求解的问题。

2）编写基于 C 程序语言的 UDF 源代码。

3）运行 FLUENT，读入并设置文件。

4）将 UDF 源代码加载进解释器进行解释。

5）关联 UDF 与 FLUENT。

6）求解计算。

7）对计算结果进行分析，与期望值进行比较。

2.10 前处理软件

2.10.1 ICEM CFD 软件的基本功能介绍

ICEM CFD 原是美国 ICEM Technologies 公司的产品，于 1990 年问世，2000 年被 ANSYS 公司收购。高度智能化的 ICEM CFD 软件拥有强大的 CAD 模型修复能力、自动中面抽取、独特的网格“雕塑”技术、网格编辑技术以及广泛的求解器支持能力，可生成块结构化网格、非结构化网格（三角形、四面体、六面体），适体坐标以及 H 型自适应网格。ICEM CFD 能为所有的 CAE 软件提供高效、可靠的分析模型，同一套网格可以输出到 STAR-CCM+、Ansys/Flotran、Phoenics、Fluent、CFX、Numeca 和 CFD++等求解器进行计算，以比较各求解器对不同模型计算分析能力上的优缺点。ICEM CFD 集成于 ANSYS Workbench 环境后，获得了 Workbench 的所有优势，为 CFD/CAE 计算提供了更方便的前处理能力。

ANSYS ICEM 在网格剖分方面提出了“雕塑”的概念：任意复杂的几何体总可以在区域上划分为多个块体（Block）的组合。使用者只需对块体划分网格，然后投射到复杂表面上。所有的网格形态在没划分前就已确定，而不像其他软件采用的“堆砌法”，网格在没“堆砌”完成前无法确定网格形态。ICEM 还可以读写世界所有知名 CAE/CFD/CEM 软件的网格格式。航空、航天、船舶行业的企业和研究所通常拥有多种 CAE/CFD/CEM，ICEM 技术为这类企业提供了统一的网格解决方案，减少了使用者在多种软件之间切换的苦恼。

ICEM CFD 的主要功能包括：

1）导入各种主流 CAD 软件（如 CATIA、UG、Pro/E、Solidworks、IDEAS 等）格式的几何模型文件，并提取文件中的曲面、曲线和点，整理和增添几何造型。

2）简单的 CAD 功能，可修复导入过程中引起的面缺失等几何特征缺失或表达错误的问题，但不适于直接建立复杂模型。

3）生成四面体、六面体、三棱柱和金字塔 4 种类型的网格。

4）网格质量检查功能，通过查看网格质量分布，帮助使用者发现质量较差的网格并及时修整。

5）边界层网格自动加密，流场变化剧烈区域网格局部加密。

6）自动光顺网格，改善网格质量。

7）手动修改网格。

8）将网格导出为一百多种专用和通用格式。

ICEM CFD 提供的网格生成工具包括：

1）ICEM Hexa——六面体网格。

2）ICEM Tetra——四面体网格。

3）ICEM Prism——棱柱体网格（边界层网格）。

4）ICEM Hybrid——四面体、六面体网混合格。

5）ICEM BF-Cart——笛卡儿边界自适应网格。

6）ICEM Global——自动笛卡儿网格生成器。

7）ICEM Quad——表面网格。

ICEM CFD 的几何模型工具具有方便的模型清理功能，能对建模过程中形成的不完整曲面进行合理的清理。此外，ICEM CFD 的网格生成工具还可集成在 CAD 环境中。用户可在自己的 CAD 系统中进行 ICEM CFD 的网格划分设置，如在 CAD 中选择面、线并分配网格大小属性等，这些数据可存储在 CAD 的原始数据库中，用户在对几何模型进行修改时，也不会丢失相关的 ICEM CFD 设定信息。

常用工具的命令及对应操作见表 2-1。

表 2-1 常用工具的命令及对应操作

常用工具分类	按钮图标	命令	对应操作
几何操作工具（Geometry）		Create Point	创建点
		Create/Modify Curve	创建/修改线
		Create/Modify Surface	创建/修改面
		Create Body	创建体
		Create Faceted	创建小面
		Repair Geometry	修补几何体
		Transform Geometry	平移几何体
		Restore Dormant Entities	恢复隐藏实体
		Delete Point	删除点
		Delete Curve	删除线
		Delete Surface	删除面
		Delete Body	删除体
		Delete Any Entity	删除所有实体
网格划分工具（Mesh）		Global Mesh Setup	全局网格设置
		Part Mesh Setup	部件网格设置
		Surface Mesh Setup	面网格设置
		Curve Mesh Setup	曲线网格设置
		Create Mesh Density	设置网格密度
		Define Connectors	定义连接
		Mesh Curve	曲线网格划分
		Compute Mesh	划分网格
拓扑划分工具（Blocking）		Create Block	创建块
		Split Block	划分块
		Merge Vertices	合并顶点
		Edit Block	编辑块
		Associate	关联
		Move Vertex	移动顶点



（续）

常用工具分类	按钮图标	命　令	对应操作
拓扑划分工具（Blocking）		Transform Blocks	变换块
		Edit Edge	编辑边
		Pre-Mesh Params	设置网格参数
		Pre-Mesh Quality Histograms	检查网格质量
		Pre-Mesh Smooth	光顺网格
		Block Checks	检查块
		Delete Block	删除块
网格输出工具（Output）		Select Solver	设置求解器
		Boundary Conditions	边界条件
		Edit Parameters	编辑参数
		Write Input	输出网格

以上工具的具体用途详见本书其余章节的实例讲解。

2.10.2 GAMBIT 软件的基本功能介绍

1. GAMBIT 的基本功能

GAMBIT 是早期 FLUENT 软件自带的前处理软件，可提供 FLUENT 软件和其他多种软件所需的网格模型。GAMBIT 的基本功能主要包括：

（1）构建模型

GAMBIT 本身提供了几何建模功能，只要模型不太复杂，一般可以直接在 GAMBIT 中完成几何建模。对于复杂的 CFD 模型，GAMBIT 一般借助专用的 CAD/CAE 软件进行几何建模，再导入软件中进行网格划分。GAMBIT 支持导入的几何模型文件的类型包括 ACIS、Parasolid、Iges 和 Stp 等格式。

（2）划分网格

GAMBIT 拥有完全非结构化的网格划分能力，能够针对复杂的几何外形生成三维四面体、六面体的非结构化网格及混合网格，且有数十种网格生成方法。GAMBIT 还提供了对复杂几何模型生成边界层网格的重要功能，边界层内的贴体网格能很好地与主流区域的网格自动衔接，大大提高了网格的质量。GAMBIT 拥有多种方便简捷的网格检查技术，使用户能快捷地检查已生成网格的质量并进行光顺优化。

（3）指定边界

网格生成后，用户可在 GAMBIT 指定边界，为后续进行 CFD 模拟时设置边界条件奠定基础。

综上，GAMBIT 软件生成 CFD 网格文件需要经过构造几何模型、划分网格、指定边界类型和区域类型 3 个步骤。

由于 FLUENT 6.3 及之前的版本均采用了 GAMBIT 软件，且入门和使用均较方便，所以目前仍拥有一定量的用户。

2. 体网格的生成方法

如图 2-122 所示，首先选择一个体，GAMBIT 根据所选择的求解器和体上的面结合类型

自动选择一种网格划分方式。可用的网格类型（见图 2-123）及其适合的方法包括：

1）Hex（六面体网格）：Map、Submap、Tet Primitive 和 Cooper。

2）Hex/Wedge：Cooper。

3）Tet/Hybrid：TGrid 和 HexCore。

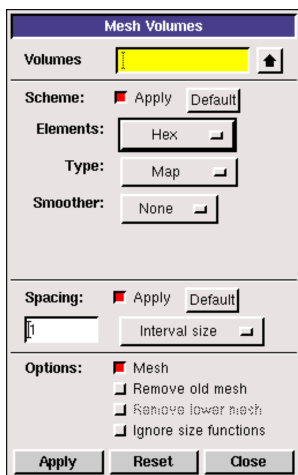


图 2-122 “体网格划分”对话框

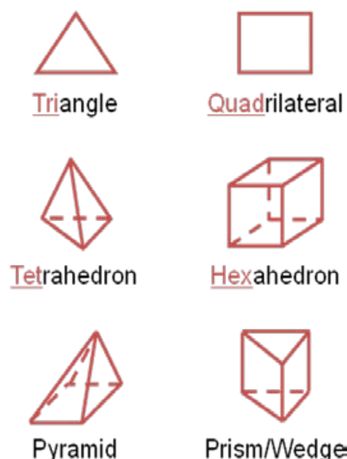


图 2-123 不同的网格形状

单击按钮，定义边界类型的对话框，如图 2-124 所示。

单击按钮，定义域类型的对话框，如图 2-125 所示。域类型与边界类型的定义方式类似，用户可以定义多个流体域或固体域。一般地，未定义的区域被指定为 fluid 类型。

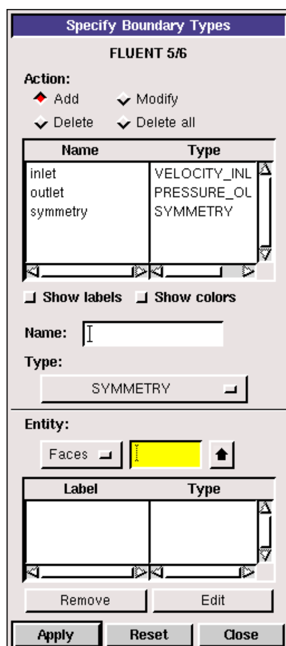


图 2-124 指定边界类型

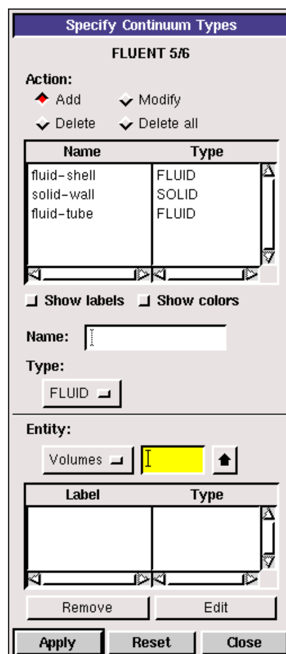


图 2-125 指定连续体

第 3 章　建筑物内流场舒适度计算

本章主要内容：

本章重点介绍利用 FLUENT 软件针对建筑物内部流场和温度场进行的模型前处理、计算求解设置、求解技巧和后处理等操作。

本章学习目标：

✧ ICEM-CFD 网格前处理软件的基本功能。

✧ 计算设置流程及求解技巧。

✧ CFD-Post 与计算结果后处理技巧。

3.1　实例简介

CFD 在暖通空调设计中的应用之一，就是通过 CFD 分析进行空调通风的气流组织设计。通风空调空间的气流组织直接影响到其通风空调的效果，好的气流组织方式能够使空调房间的温度、湿度和速度很容易地符合设计要求。反之，差的气流组织方式可能根本就达不到设计要求。因此，在空调系统设计完成之后施工之前，预测空调系统的气流组织状况很重要。借助 CFD 可以预测仿真其中的空气气流和温度分布的详细情况，从而指导设计。

某建筑物空调房间的布局图如图 3-1 所示。由图 3-1 可以看出空调风口和热源的相对位置。本章首先通过 ICEM-CFD 画出三维模型，进行网格划分、边界条件设定，建立此房间流场和温度分布的计算模型，然后利用 FLUENT 求解器对计算进行设置并进行求解，最后利用 CFD-Post 对计算结果进行后处理。

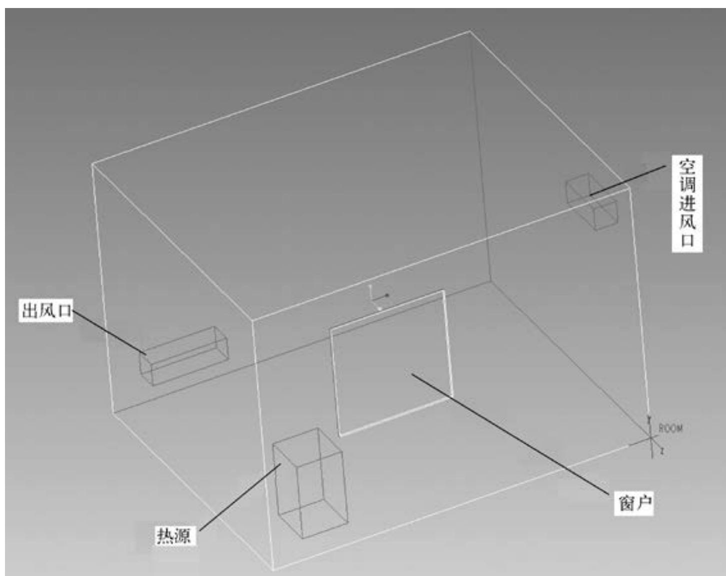


图 3-1　某建筑物空调房间的布局图

3.2 建筑物模型的前处理

如图 3-2 所示，选择[File]>[Import Geometry]>[STEP/IGES]菜单命令，打开“Select STEP/IGES files”对话框。

1）选择“room.IGS”，导入该文件，如图 3-3 所示。

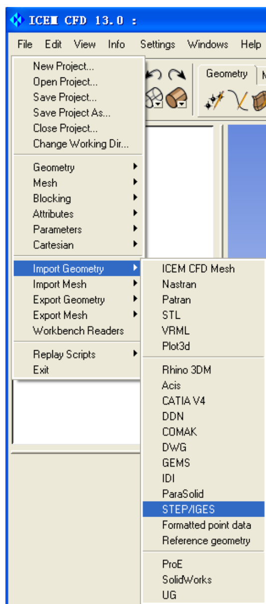


图 3-2　打开“Select STEP/IGES files”对话框

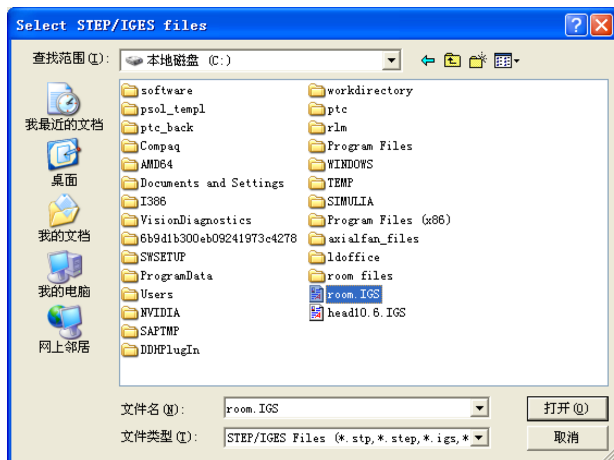


图 3-3　导入文件

2）导入方式属性栏出现导入该文件的有关选项，如图 3-4 所示。

3）保持默认设置，单击“OK”按钮。弹出“Create new project”对话框，单击“Yes”按钮，确认建立该项工作，如图 3-5 所示。



图 3-4　导入方式属性栏

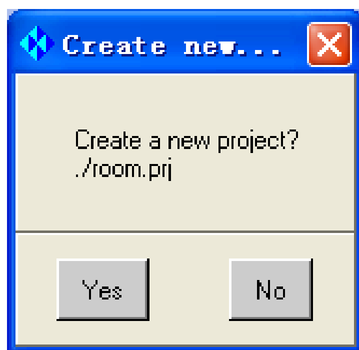


图 3-5　确认建立该项工作

4）视图区出现导入后的 room.IGS 文件，如图 3-6 所示。

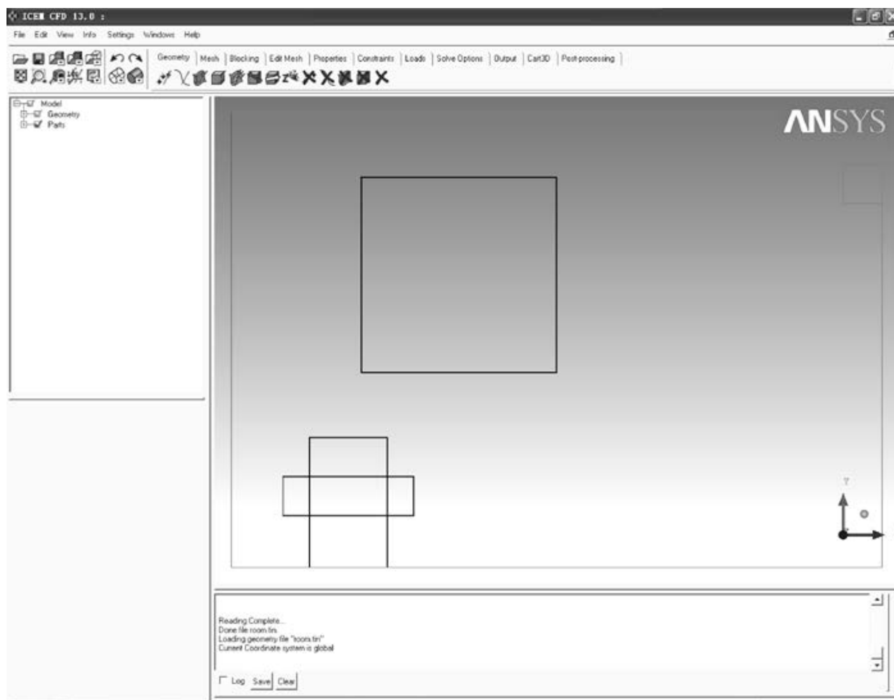


图 3-6　导入后的 room.IGS 文件

5）旋转并缩小视图，同时展开左侧项目树[Model]>[Parts]，可以看到，模型存在很多个小面，如图 3-7 所示。

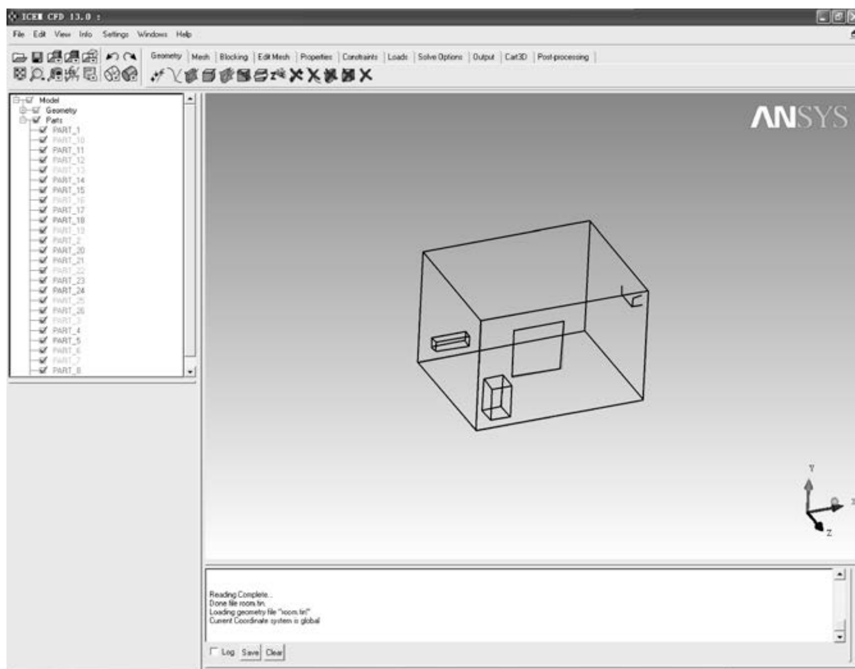


图 3-7　展开项目树

6）开始设置边界条件，右键单击[Model]>[Parts]，选择“Create Part”命令，如图 3-8 所示。

7）“Create Part”项属性栏展开，输入“Part”名：INLET，如图 3-9 所示。

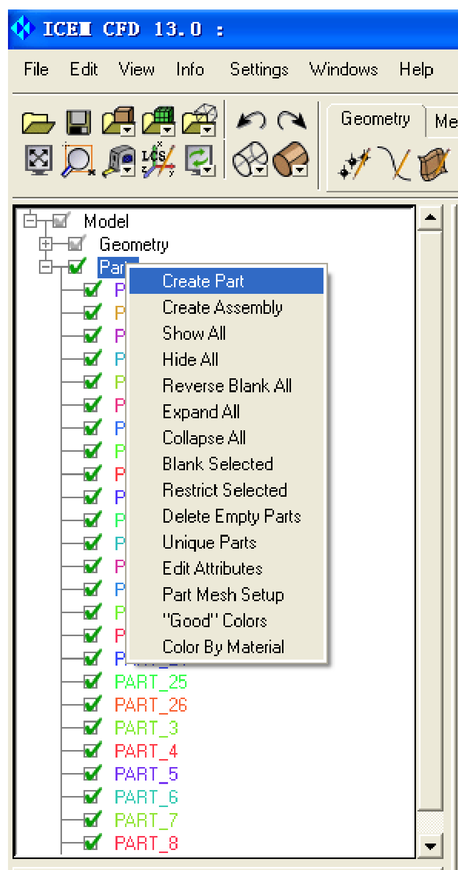


图 3-8 选择“Create Part”命令

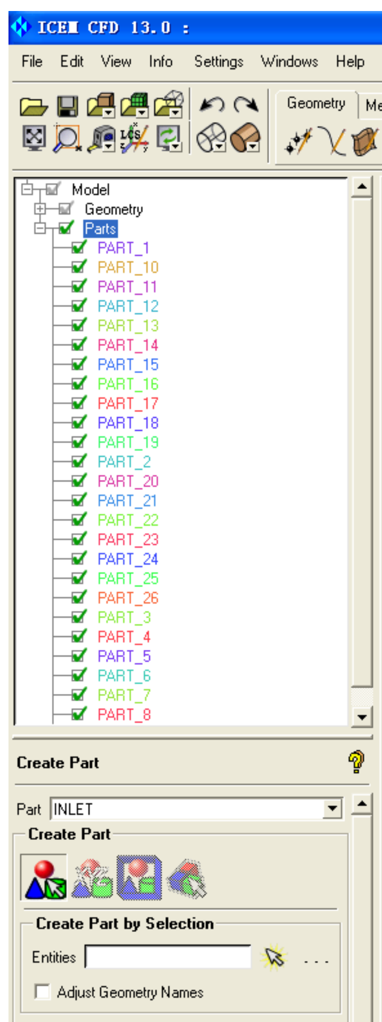


图 3-9 输入“Part”名

8）勾选[Model] >[Geometry] >[Surfaces]，同时单击“Create Part”项属性栏中“Entities”项右侧的按钮，此时视图区中的鼠标变为十字形式，选择 INLET 对应的面，如图 3-10 所示。

9）单击鼠标中键或属性栏中的“OK”按钮，[Model]>[Parts]栏中出现“INLET”项。再次输入“Part”名：OUTLET，选择 OUTLET 对应的面，如图 3-11 所示。

10）单击鼠标中键或属性栏中的“OK”按钮，[Model]>[Parts]栏中出现“OUTLET”项。

11）按照同样的方法依次创建 WINDOW 和 HEATSOURCE 两个 Part，分别如图 3-12 和图 3-13 所示。注意，HEATSOURCE 为长方体形状，应选择除底面外的 5 个面。

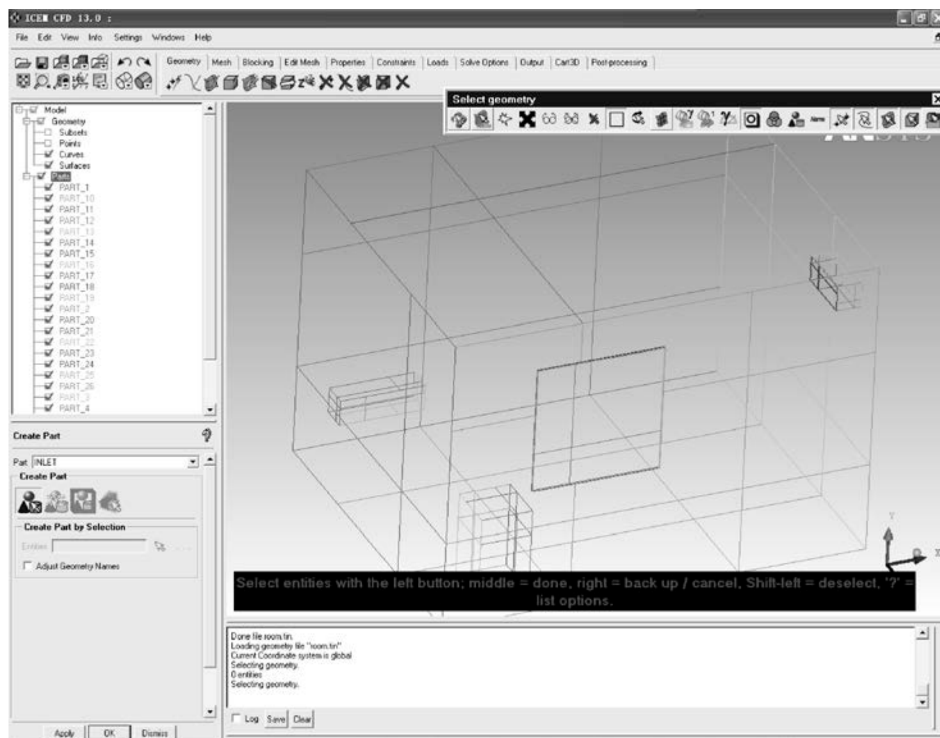


图 3–10　选择 INLET 对应的面

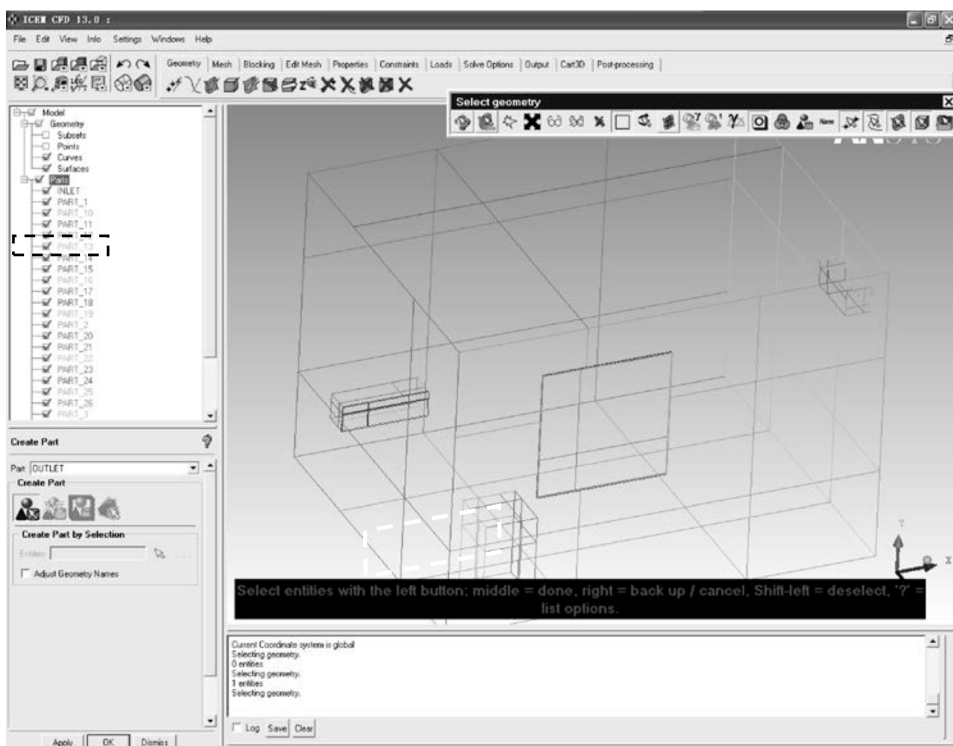


图 3–11　选择 OUTLET 对应的面

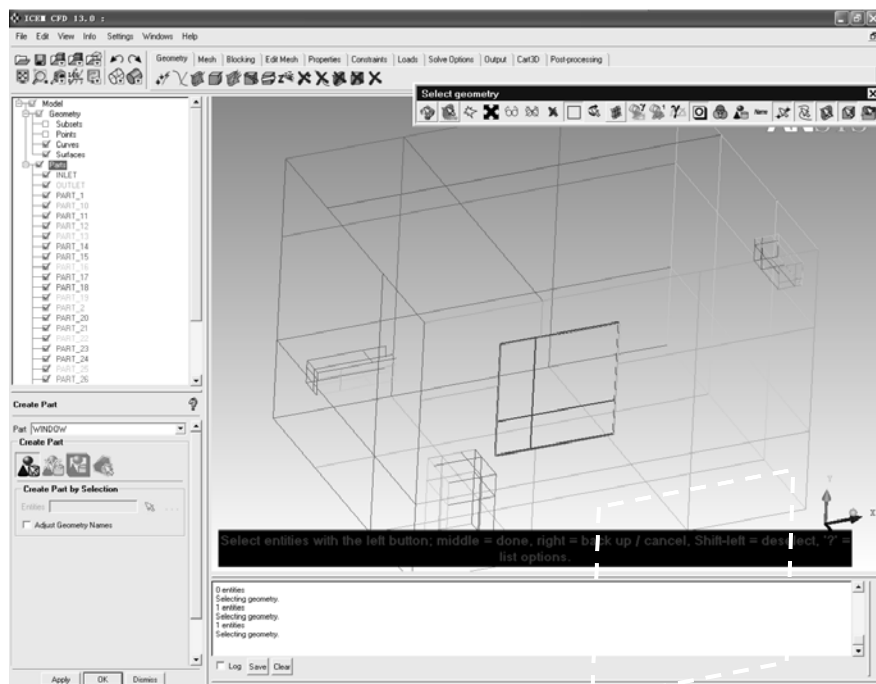


图 3-12　创建 WINDOW

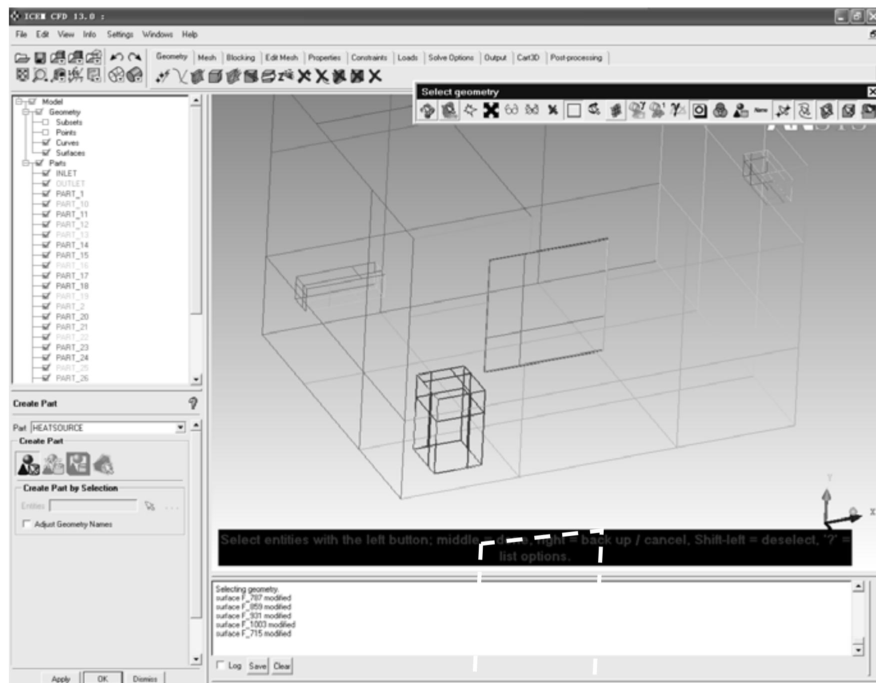


图 3-13　创建 HEATSOURCE

12）至此完成 Part 项的设置，这些设置为网格划分和导入 FLUENT 设置边界条件提供了方便。注意，如果在选择的过程中选错了面，可单击鼠标右键，取消已选择的面，再次选择正确的面。

13）单击工具栏中的[Geometry]>[Create Body]项，展开属性栏，如图 3-14 所示。

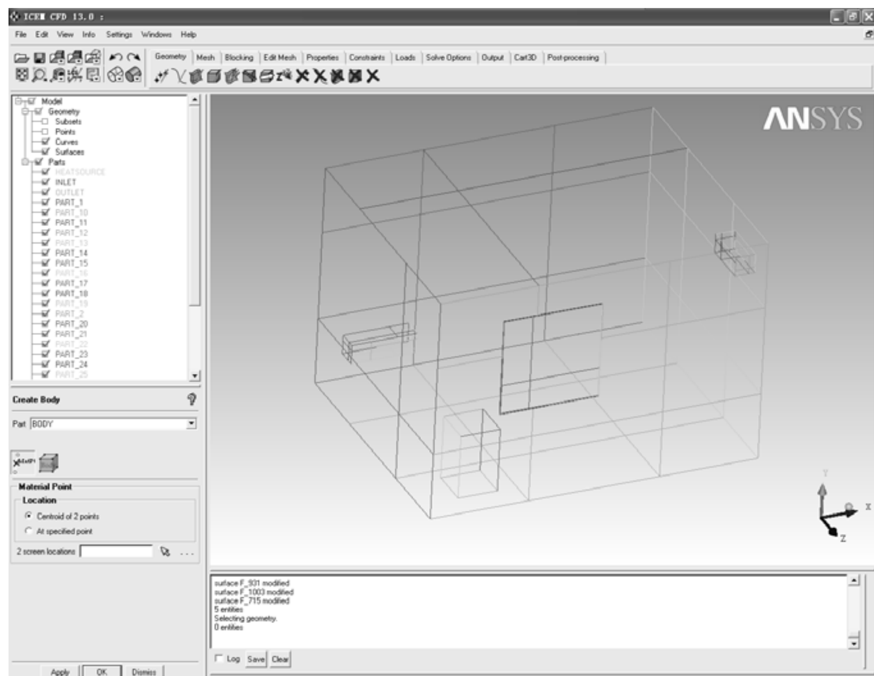


图 3-14　Create Body 项属性栏

14）输入 Part 名：FLUID，同时单击属性栏中“2 screen locations”右侧的按钮，此时视图区中的鼠标变为十字形式，选择如图 3-15 所示的两个顶点。

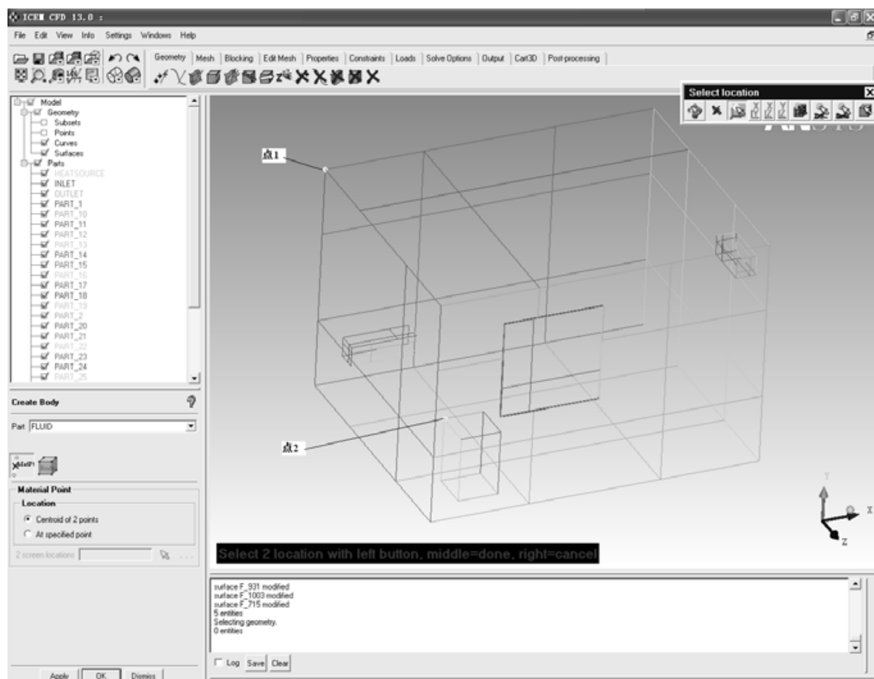


图 3-15　选择两个顶点

15）单击鼠标中键或属性栏中的“OK”按钮，[Model]>[Parts]栏和视图区中生成“FLUID”项，如图 3-16 所示。

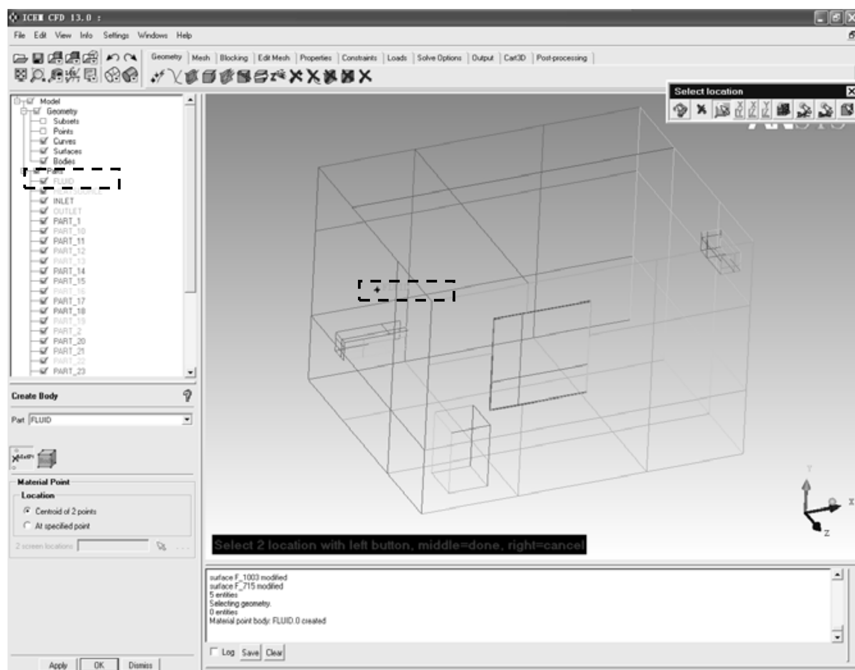


图 3-16　生成“FLUID”项

16）单击工具栏中的[Mesh]>[Global Mesh Setup]项，展开属性栏，进行网格尺寸设置，如图 3-17 所示。

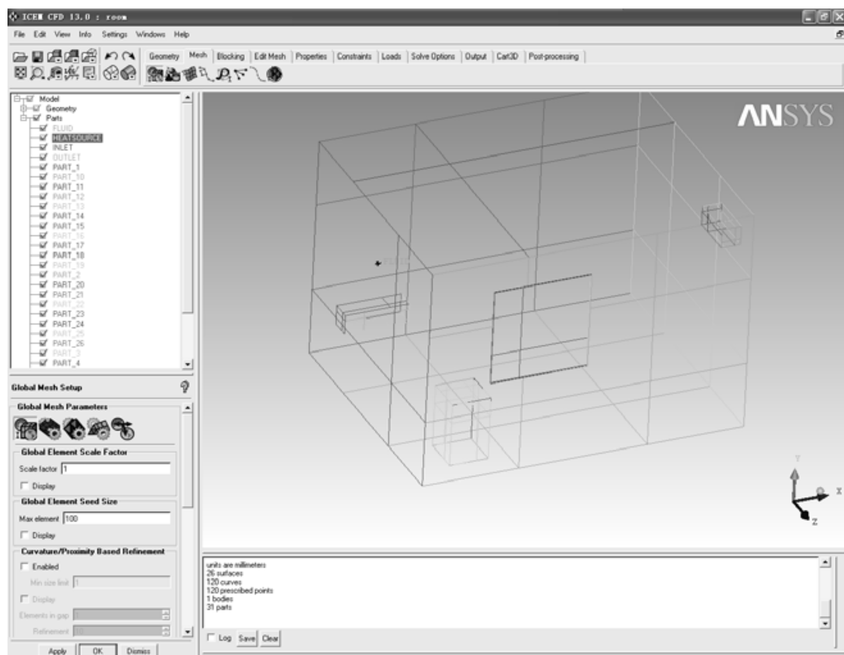


图 3-17　设置网格尺寸

17）在“Global Element Seed Size”项输入 Max element：100，即最大网格尺寸为 0.1m。单击“Apply”按钮，确认操作。由于此模型较简单，所以在进行非结构化网格划分时采用默认的全局面网格参数设置及每个 part 的面网格尺寸定义。Compute Mesh 项属性栏如图 3-18 所示。

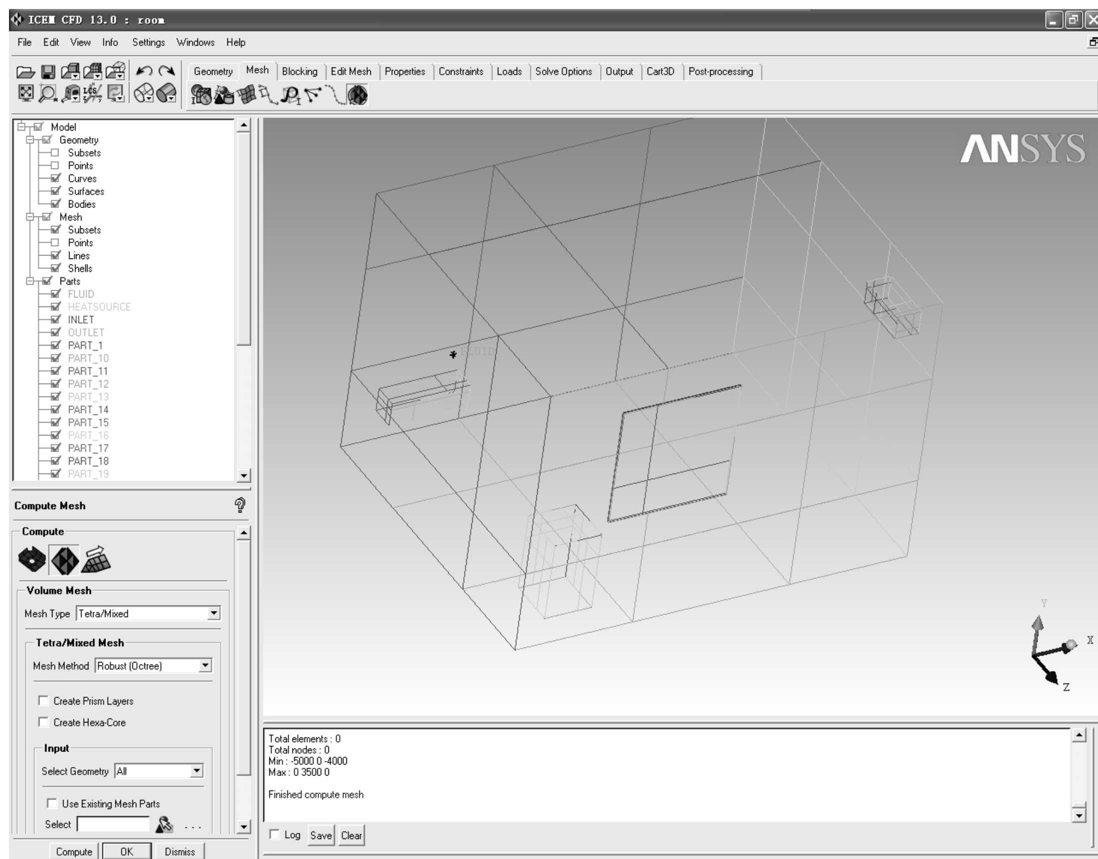


图 3-18　Compute Mesh 项属性栏

18）软件界面右下侧的命令行和进度条显示出网格划分进度，如图 3-19 所示。

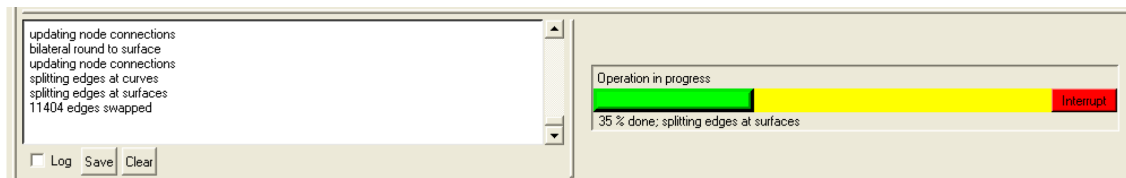


图 3-19　网格划分进度

19）网格划分完毕，结果显示网格总数为 1005147，如图 3-20 所示。

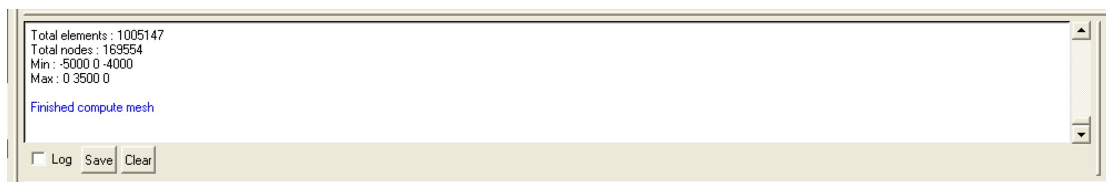


图 3-20 网格总数

20）视图区中的网格如图 3-21 所示。右键单击[Model]>[Mesh]命令，选择[Cut Plane]>[Manage Cut Plane]项。

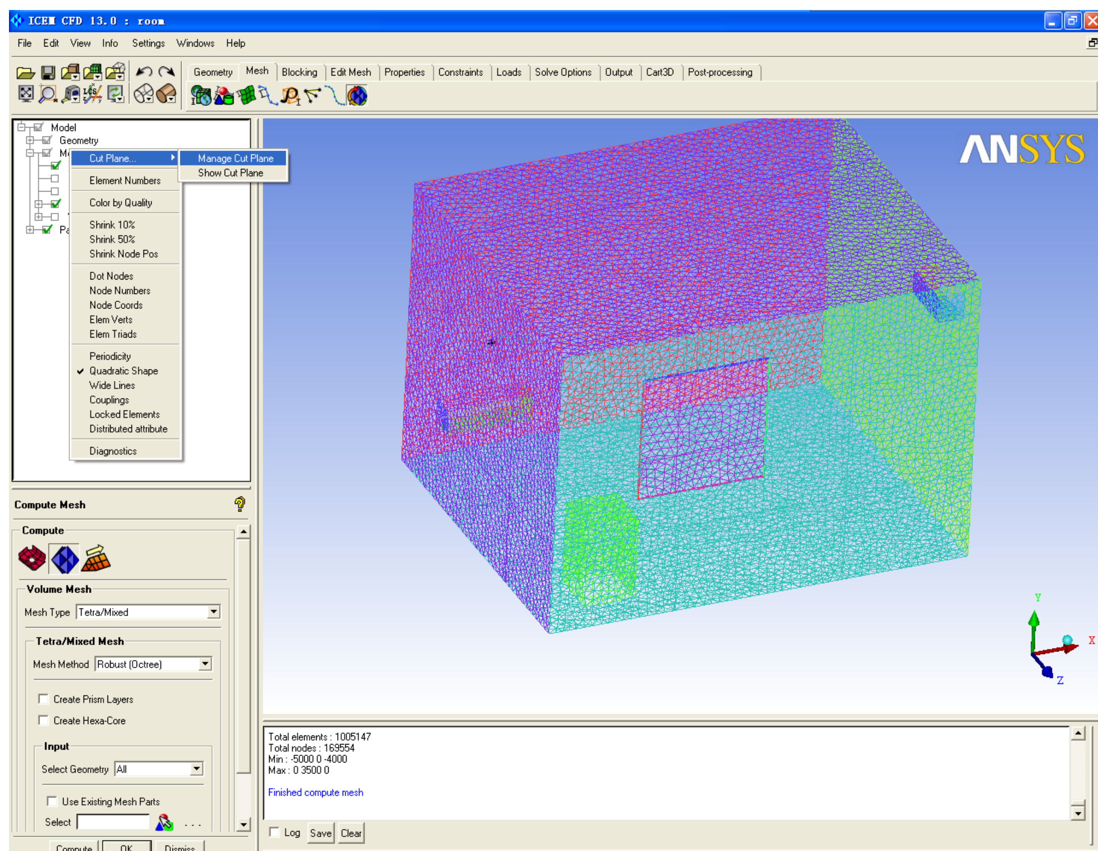


图 3-21 视图区中的网格

21）“Manage Cut Plane”项属性栏展开，如图 3-22 所示。勾选并右键单击[Model] >[Mesh] >[Volumes]项，选择“Solid & Wire”项。

22）视图区中的网格分层显示如图 3-23 所示。

23）单击工具栏中的[Output]>[Select Solver]项，展开属性栏，如图 3-24 所示。选择网格输出方式，将“Output Solver”项选择为“Fluent_V6”，将“Common Structural Solver”项选择为“ANSYS”，单击“Apply”按钮，确认操作。注意，此处可以先检查一下网格质量，若没有问题，再输出网格，若有问题，就需进行网格质量调节，此处不再详述。

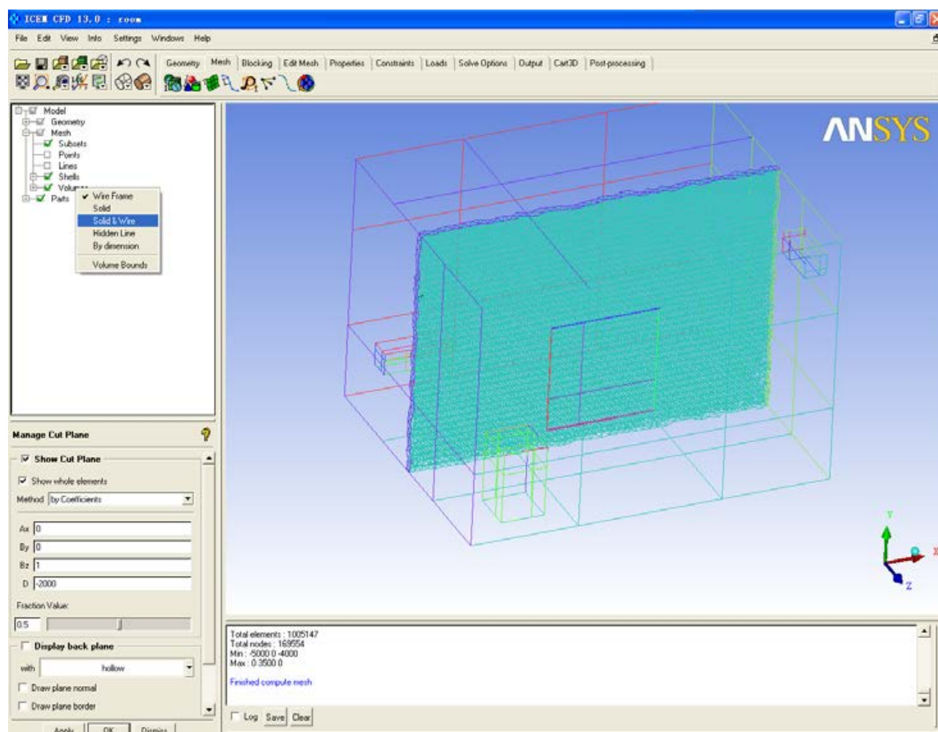


图 3-22　选择“Solid & Wire”项

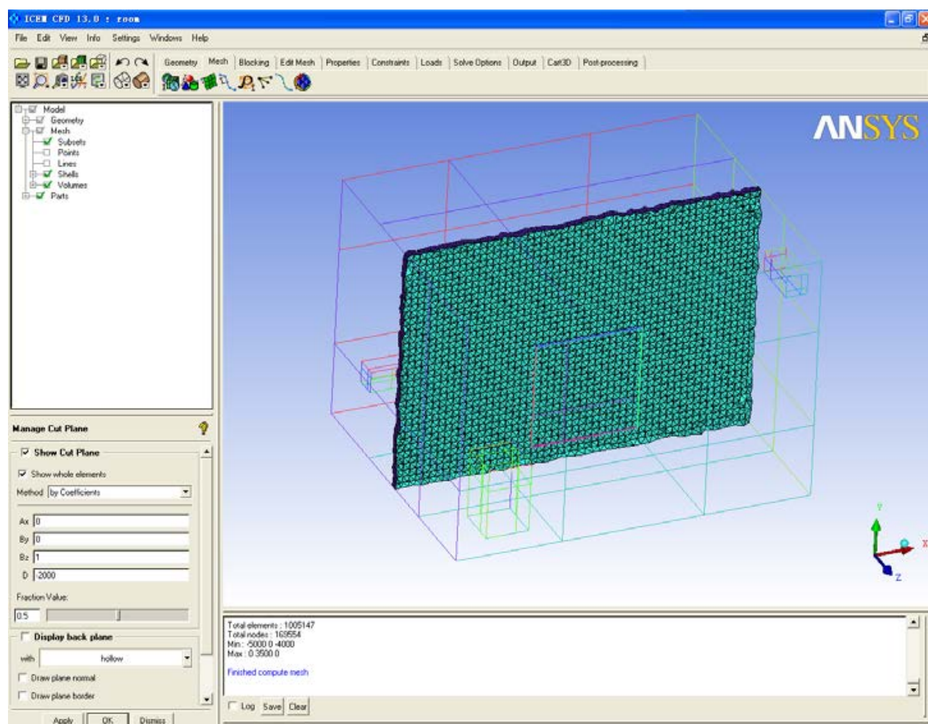


图 3-23　显示截面网格

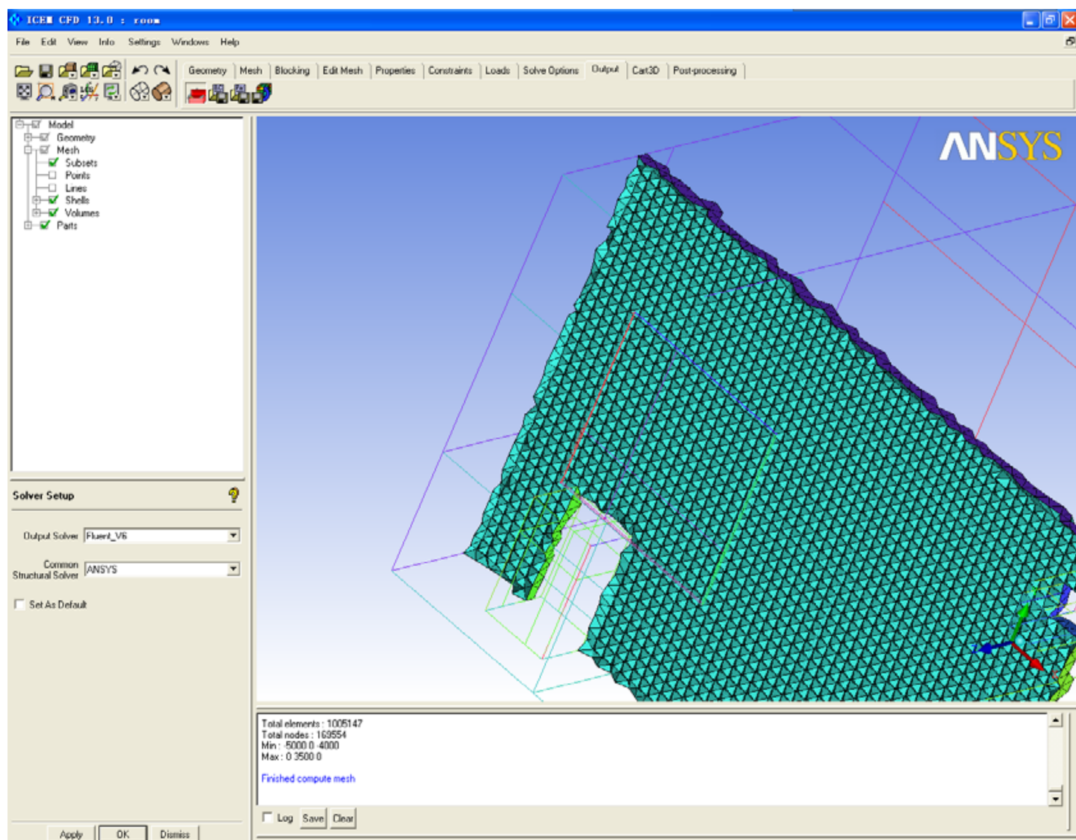


图 3-24 选择网格输出方式

24）单击工具栏中的[Output]>[Write Input] 项，弹出“Save”对话框，如图 3-25 所示。单击“Yes”按钮，稍后出现“打开”对话框，选择文件保存位置，默认位置为文件“room.uns”对应的位置，如图 3-26 所示。

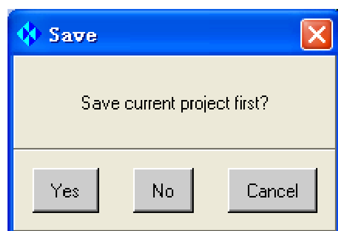


图 3-25 “Save”对话框

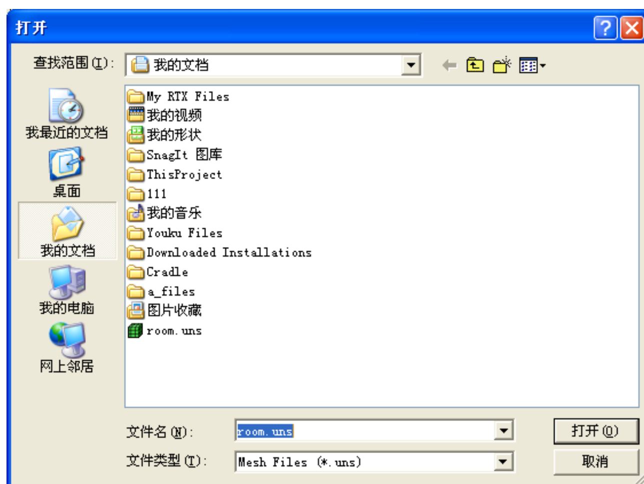


图 3-26 选择文件保存位置

25）单击“打开”按钮，出现“Fluent V6”对话框，如图 3-27 所示。

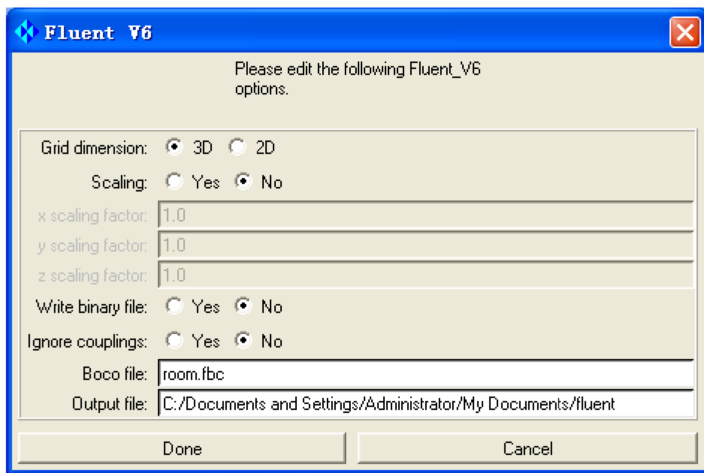


图 3-27 “Fluent V6”对话框

26）在“Output file”栏输入文件保存的地址及文件名，如图 3-28 所示。单击“Done”按钮，执行保存操作。查看 C 盘的“room.msh”文件，大小为 60672 KB。

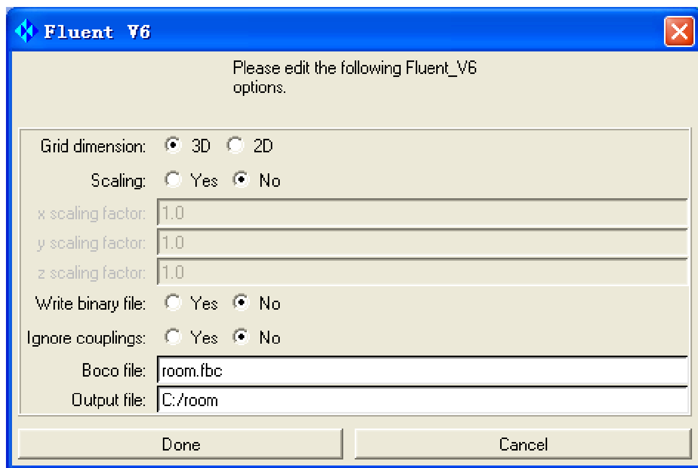


图 3-28 输入文件保存的地址及文件名

27）单击工具按钮，保存该项工作的所有内容。

3.3 室内空气流场计算

3.3.1 物理条件的设置

1）采用默认设置，打开 FLUENT 软件界面，导入网格文件，如图 3-29 所示，选择 [File]> [Read] >[Mesh...]菜单命令，弹出如图 3-30 所示的“Select File”对话框。选择文件

"room.msh"，单击"OK"按钮，导入网格文件。

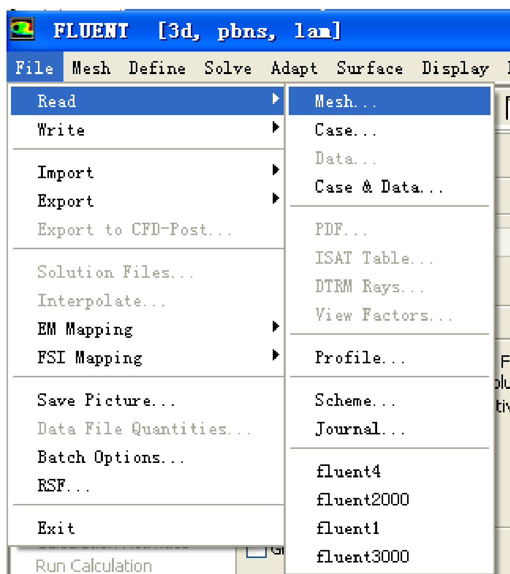


图 3-29 导入网格文件

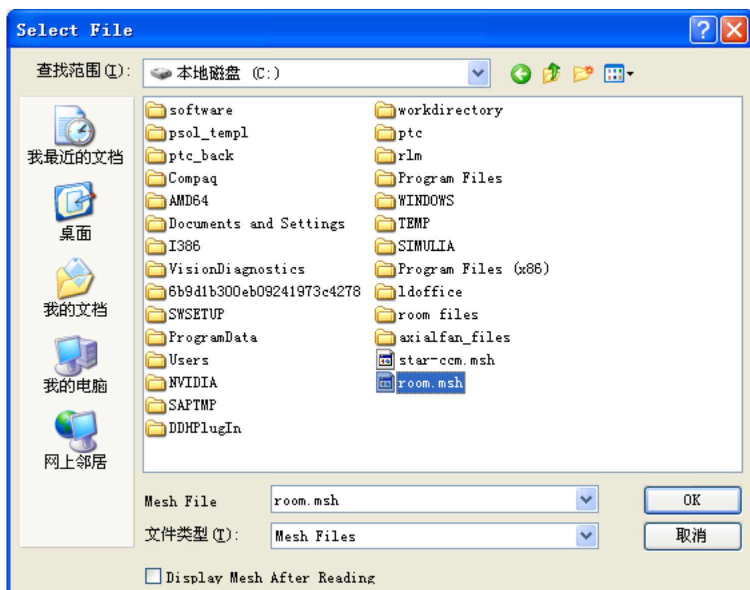


图 3-30 选择文件

2）如图 3-31 所示，选择 [Display]> [Mesh...]菜单命令，打开"Mesh Display"对话框。

3）如图 3-32 所示，单击"Mesh Display"对话框中的"Display"按钮，视图区显示出计算模型的网格。可以看到，软件将进口处显示为蓝色，将出口处显示为红色。单击"Close"按钮退出。

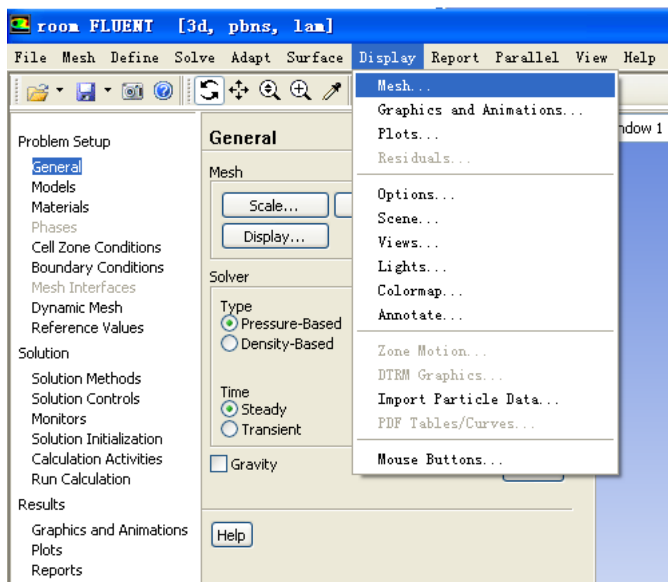


图 3-31　打开“Mesh Display”对话框

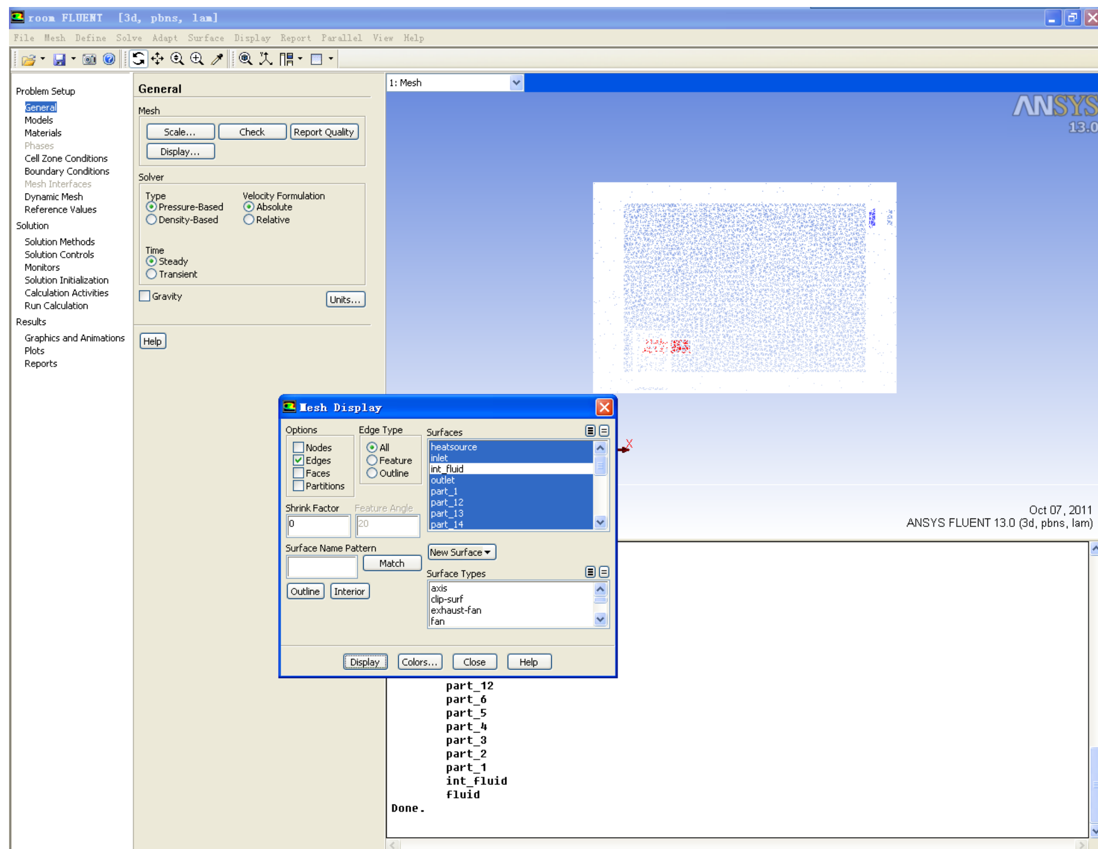


图 3-32　计算模型的网格

4）单击左侧项目树[Problem Setup]>[General]项属性栏中的“Scale...”按钮，弹出如图 3-33 所示的“Scale Mesh”对话框。

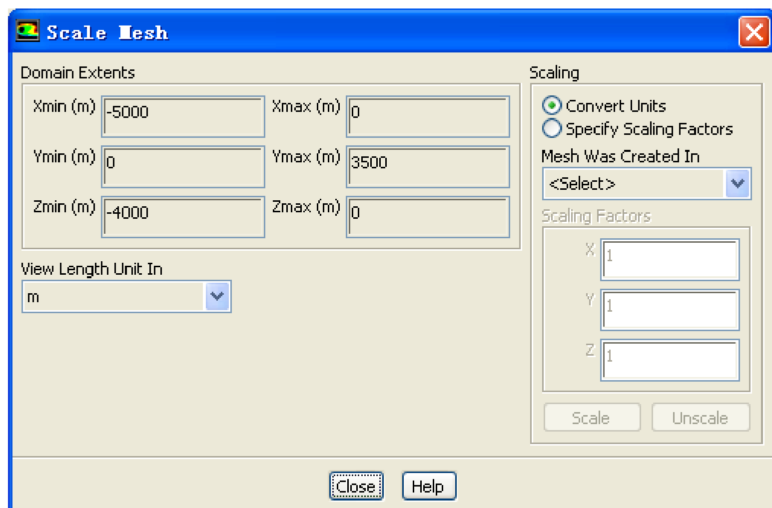


图 3-33 “Scale Mesh”对话框

5）由于此模型三维建模时采用的单位为 mm，而 FLUENT 采用的默认单位是 m，因此需要对网格进行缩放。如图 3-34 所示，将对话框右侧的“Mesh Was Created In”项设置为“mm”，“Scaling Factors”下的各项值则相应地由 1 改变为 0.001。

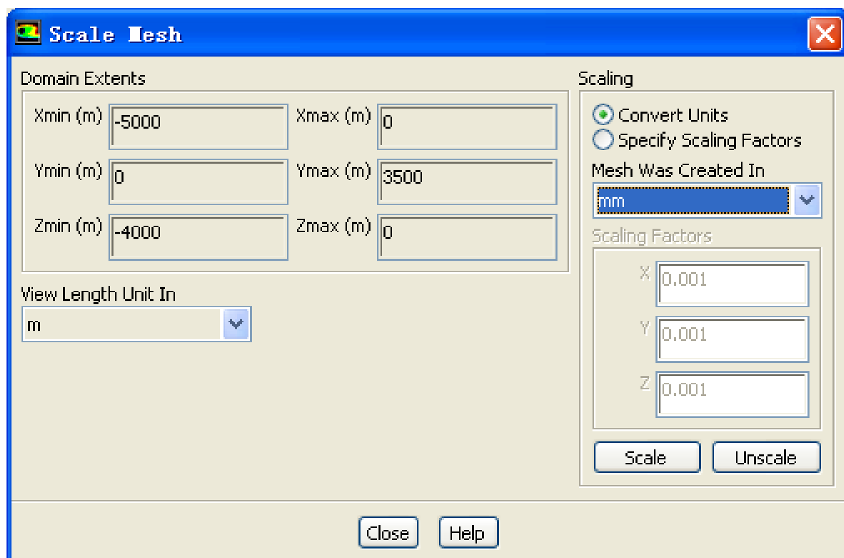


图 3-34 修改“Mesh Was Created In”项

6）单击“Scale”按钮，计算域的坐标范围变换为图 3-35 中的形式。单击“Close”按钮退出。



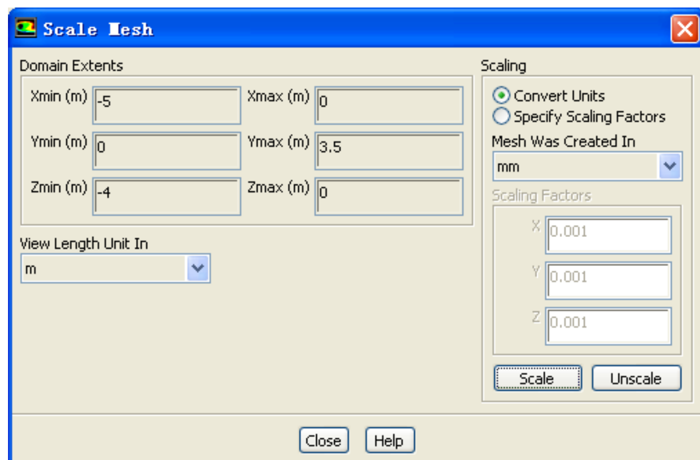


图 3-35　改变计算域的坐标范围

7）默认选择[Problem Setup]>[General]项属性栏中的各项设置。选择[Problem Setup]>[Models]项，双击其属性栏中的“Viscous-Laminar”项，更换流体计算模型，如图 3-36 所示。

8）在打开的“Viscous Model”对话框中，默认为“Laminar”层流选项，如图 3-37 所示。

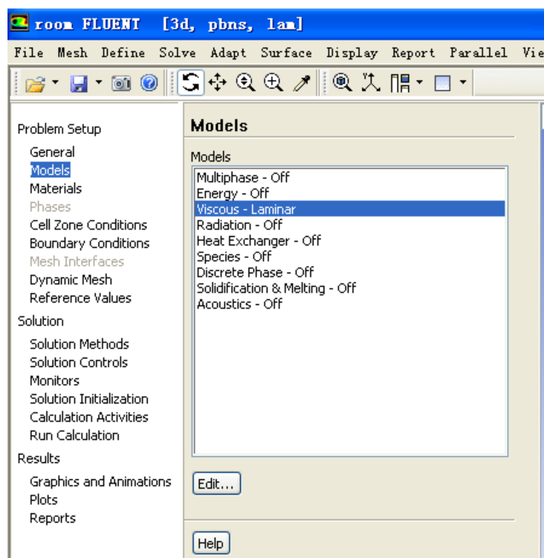


图 3-36　更换流体计算模型

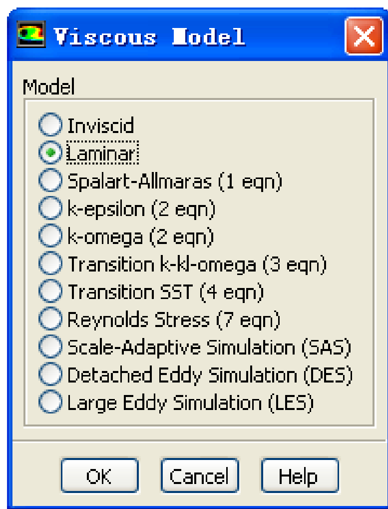


图 3-37　“Viscous Model”对话框

9）选择“k-epsilon（2 eqn）”项，对话框展开为如图 3-38 所示的形式。单击“OK”按钮，确认选择。

10）双击[Problem Setup]>[Models]项属性栏中的“Radiation-Off”项，弹出“Radiation Model”对话框，如图 3-39 所示。

11）选择“Solar Load”栏下的“Solar Ray Tracing”项，对话框展开为如图 3-40 所示的形式。

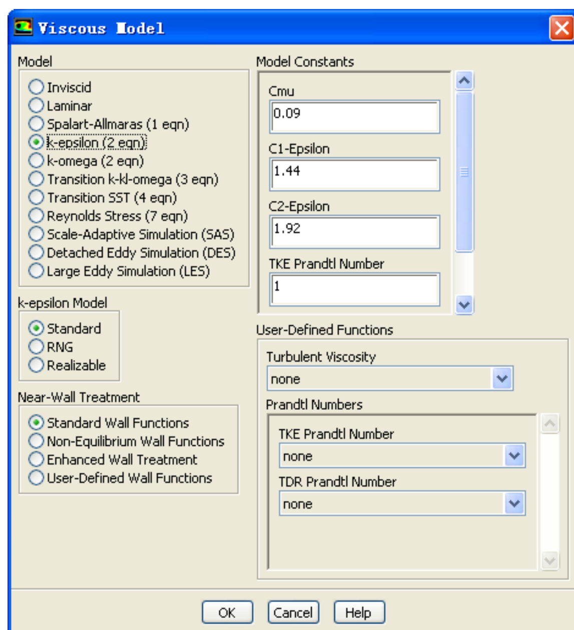
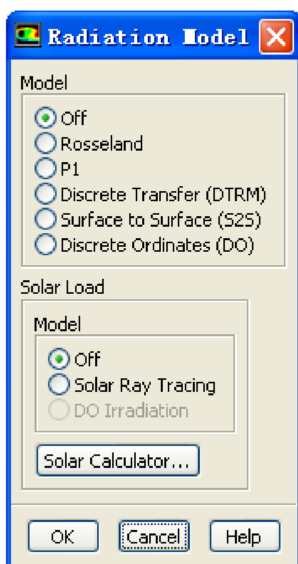


图 3-38　选择“k-epsilon（2 eqn）”项



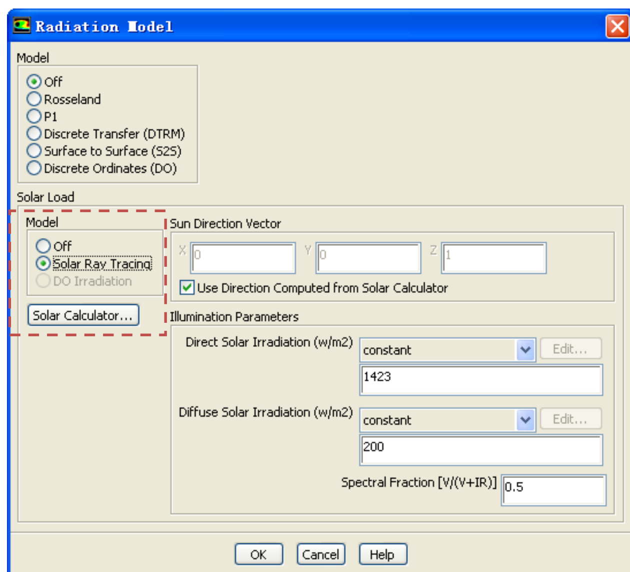


图 3-39　“Radiation Model”对话框　　　　图 3-40　选择“Solar Ray Tracing”项

12）保持默认设置，单击“OK”按钮退出。

13）保持[Problem Setup]>[Materials]和[Problem Setup]>[Cell Zone Conditions]两项属性栏设置不变。单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“inlet”边界，软件默认其为“velocity-inlet”条件。单击“Edit...”按钮，在弹出的“Velocity Inlet”对话框中输入入口速度为 5m/s，如图 3-41 所示。单击“OK”按钮退出。

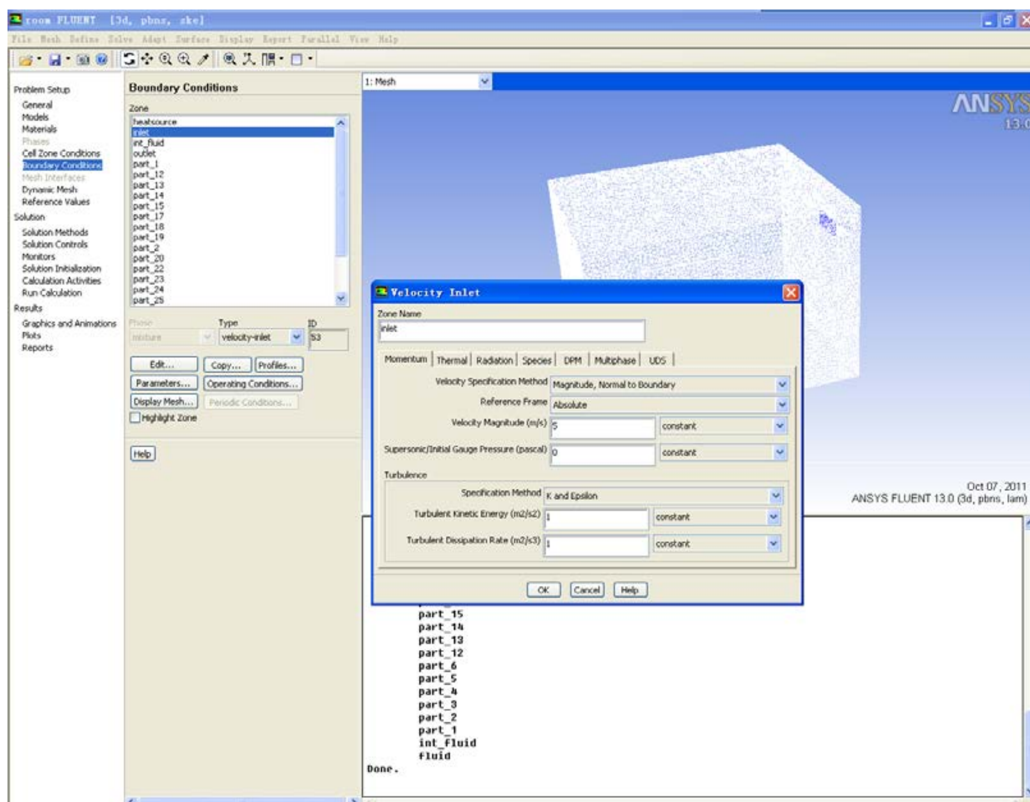


图 3-41　输入入口速度

14）单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“outlet”边界，将“velocity-inlet”条件更改为“Outflow”条件。在如图 3-42 所示的对话框中单击“Yes”按钮，然后在如图 3-43 所示的“Outflow”对话框中单击“OK”按钮，保持默认设置。

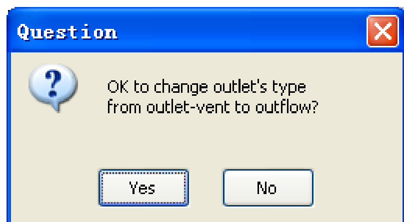


图 3-42　确认修改边界条件

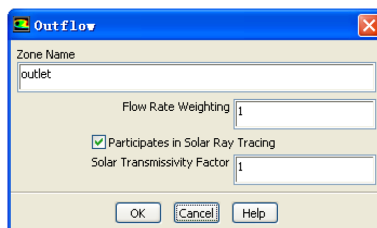


图 3-43　确认 Outflow 边界条件

15）单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“heatsource”边界。默认其为 wall 边界，单击“Edit...”按钮，在弹出的“Wall”对话框中选择 Tab 页“Thermal”，然后选择“Thermal Conditions”栏下的“Heat Flux”项，在右侧“Heat Flux（w/m2）”项中输入 2000，作为壁面热流量定义值，如图 3-44 所示。单击“OK”按钮退出。

16）修改窗口边界条件。单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“window”边界。默认其为 wall 边界，单击“Edit...”按钮，在弹出的“Wall”对话框中选择 Tab 页“Radiation”，将“BC Type”项更改为“semi-opaque”方式，保持选择“Participates in Solar Ray Tracing”，如图 3-45 所示。

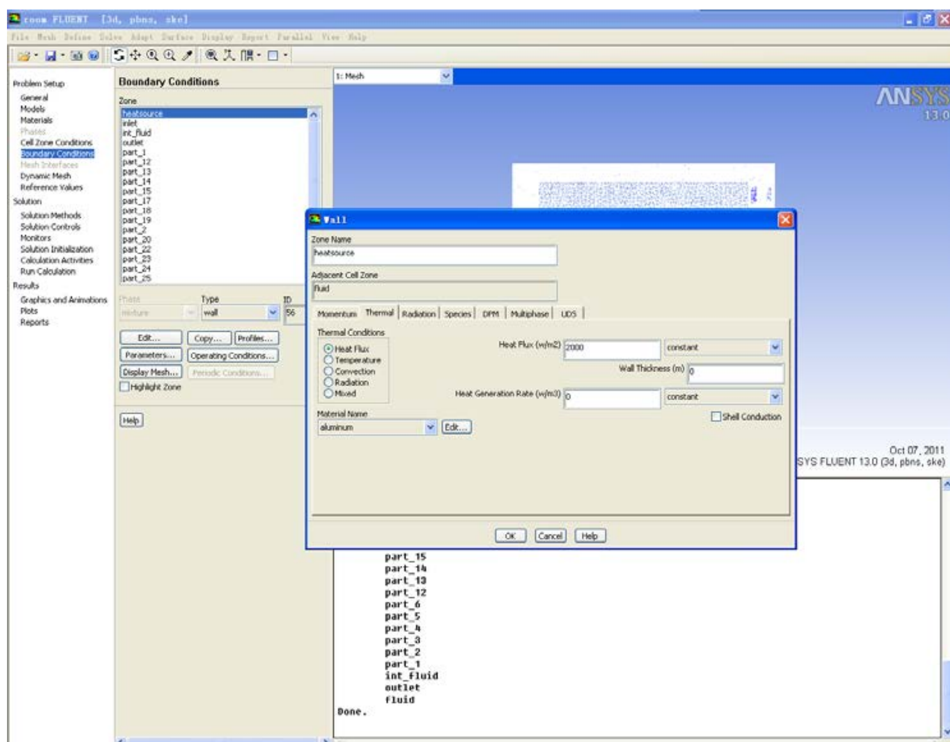


图 3-44 输入壁面热流量

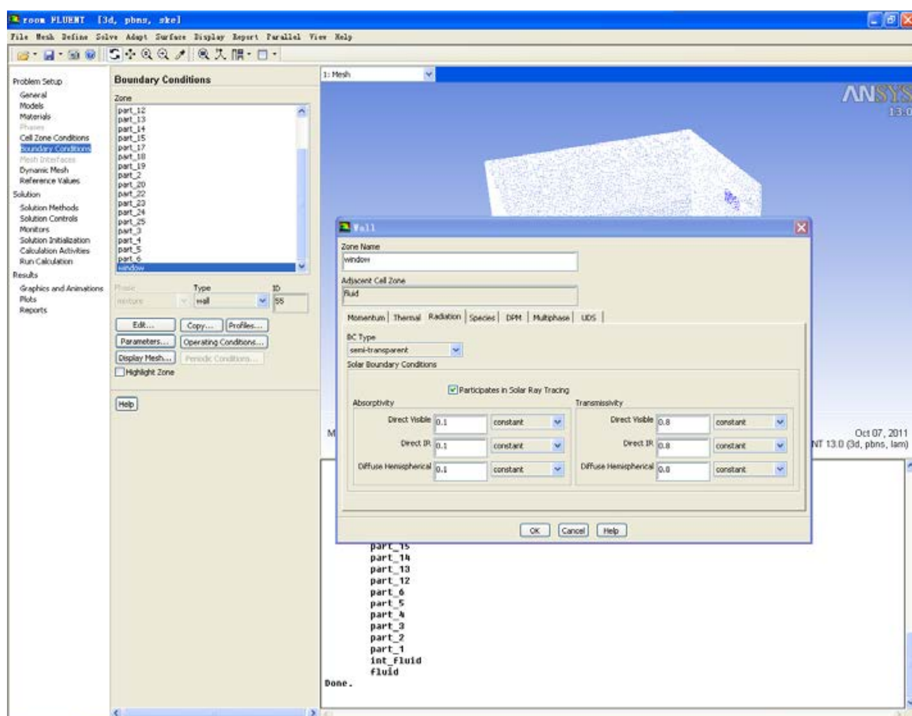


图 3-45 修改窗口边界条件



这里的 Absorptivity 和 Transmissivity 分别指吸收率和发射率。此处采用默认设置。

3.3.2 求解条件的设置

1）保持[Solution]>[Solution Methods]、[Solution]>[Solution Controls]和[Solution]>[Monitors] 3 项设置不变。单击[Solution]>[Solution Initialization]项，将其属性栏“Compute from”项设置为“inlet”边界，其余设置不变，如图 3-46 所示。单击“Initialize”按钮，对计算进行初始化。

2）保持[Solution]>[Calculation Activities]项设置不变。

3）设置迭代步数。单击[Solution]>[Run Calculation]项，将其属性栏中的“Number of Iterations”项设置为 500，如图 3-47 所示。单击“Calculate”按钮，开始计算。

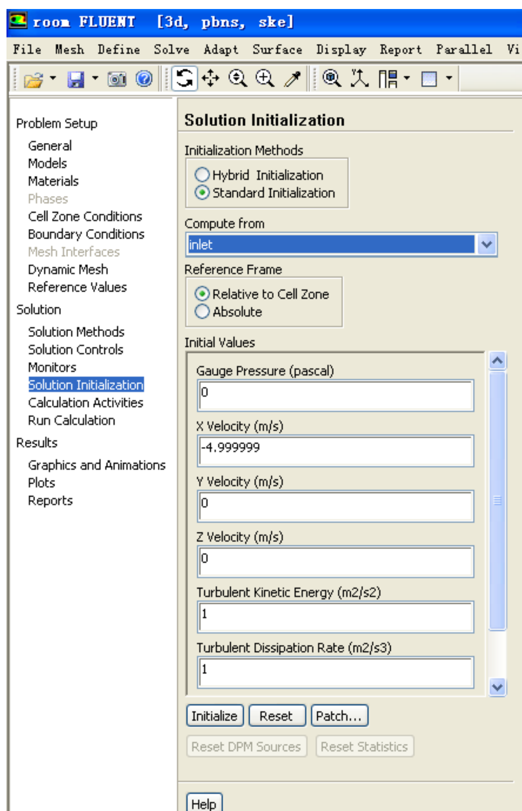


图 3-46 对计算进行初始化

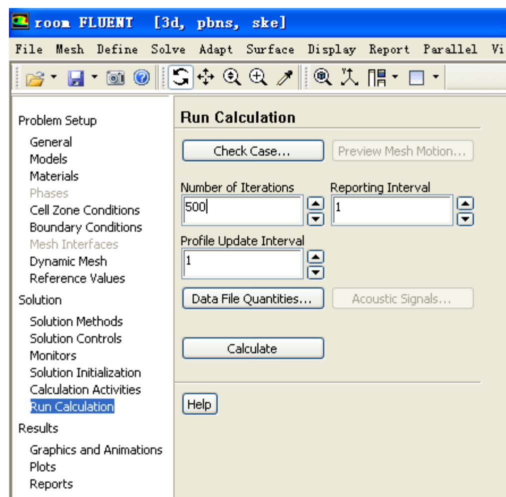


图 3-47 设置迭代步数

4）在计算过程中，视图区的残差曲线和脚本区各迭代步数据随迭代计算更新。用户如果发现收敛曲线不好或是计算报错，随时可以中断计算过程（单击“Working”对话框中的“Cancel”按钮即可），如图 3-48 所示。

5）当计算进行到第 263 步时，“Information”对话框显示计算完成的信息，如图 3-49 所示。单击“OK”按钮确认。

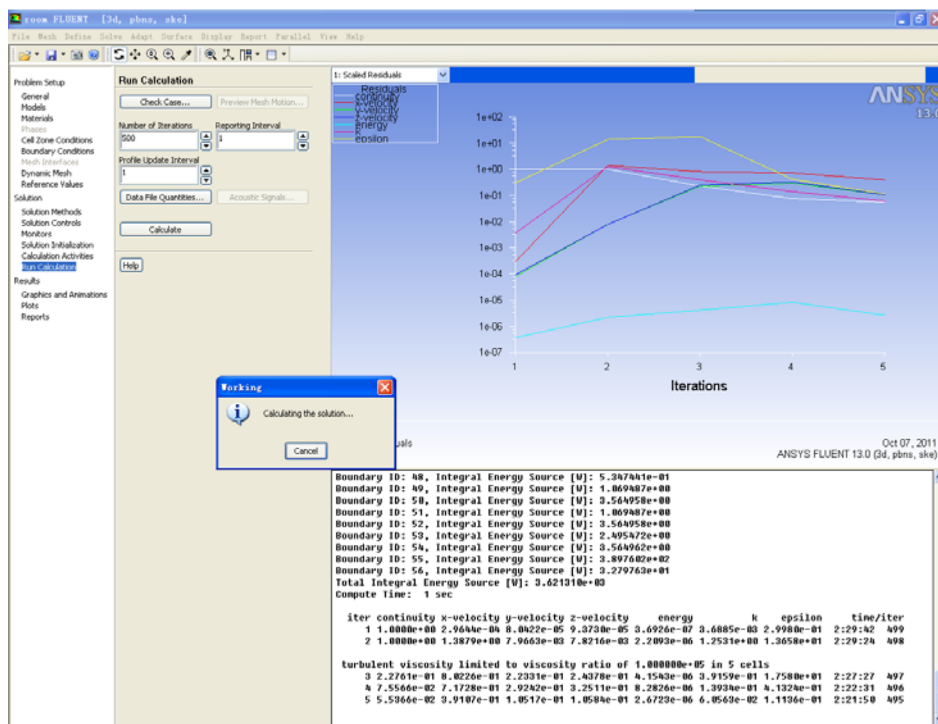


图 3-48　残差曲线和脚本区各迭代步数据

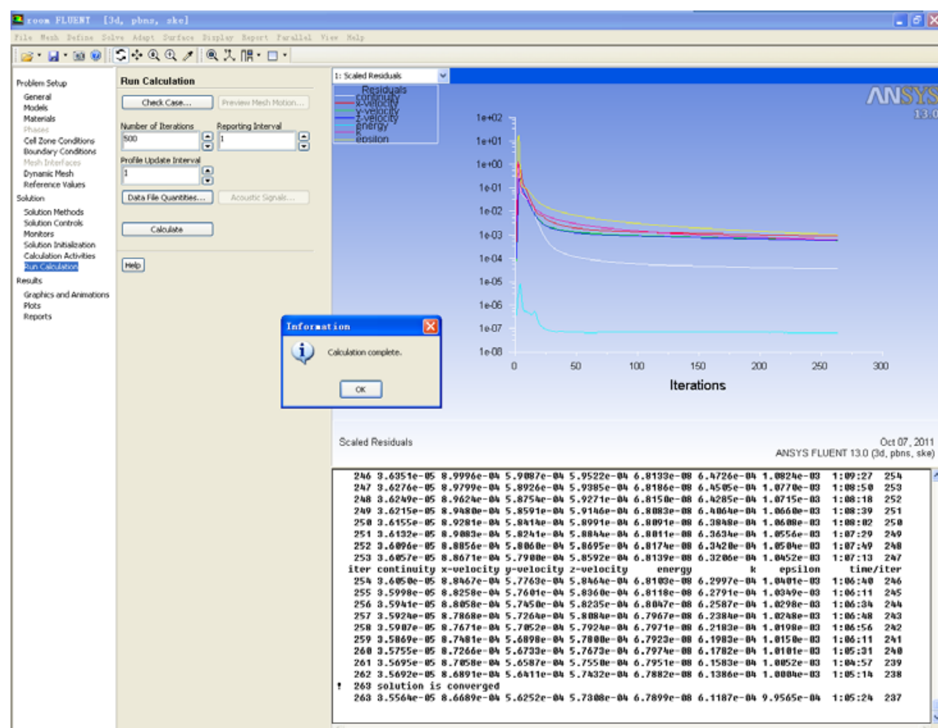


图 3-49　计算完成

6）保存结果文件。选择[File]> [Write] >[Case & Data...]菜单命令，如图 3-50 所示。

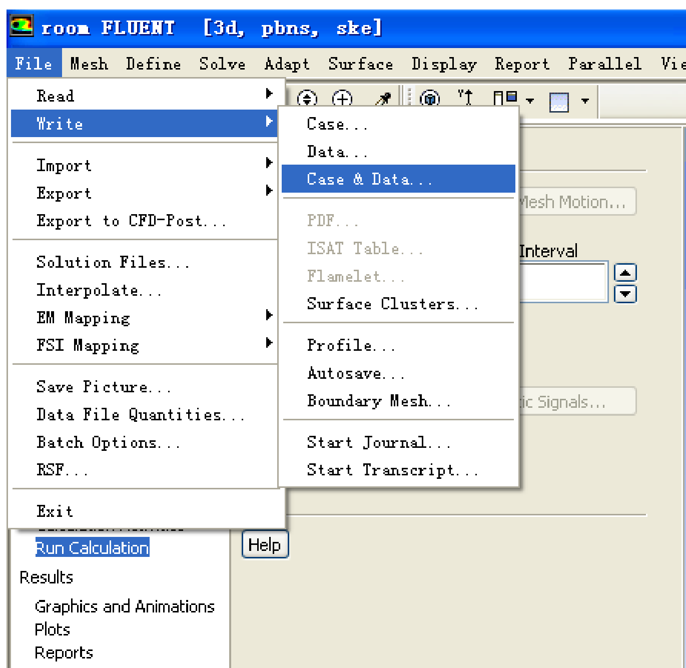


图 3-50　保存结果文件

7）如图 3-51 所示，输入文件名“room.cas”，单击“OK”按钮保存文件。

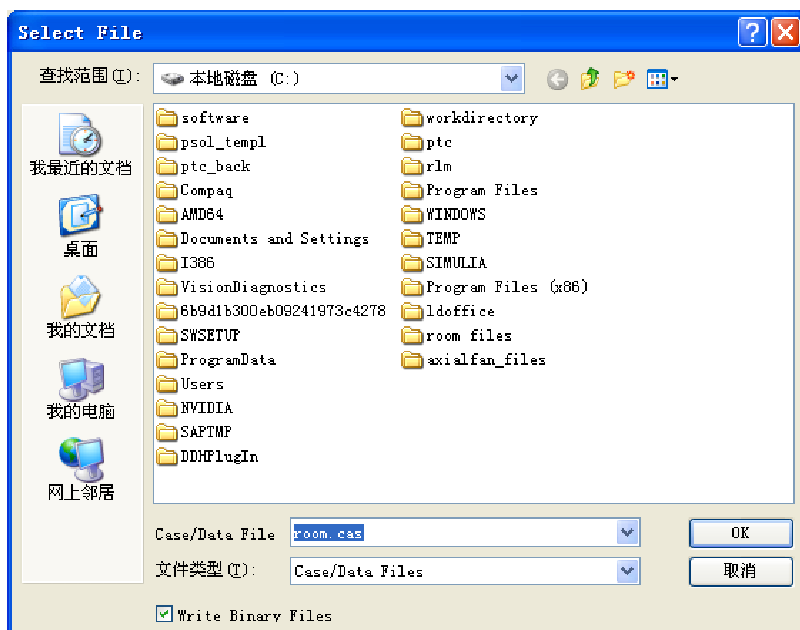


图 3-51　输入文件名“room.cas”

3.4 室内空气流场分析

3.4.1 室内流线图的绘制

1）导入结果文件，进行室内空气流场的后处理。如图 3-52 所示，选择[File]>[Load Results...]菜单命令，打开“Load Results File”对话框。

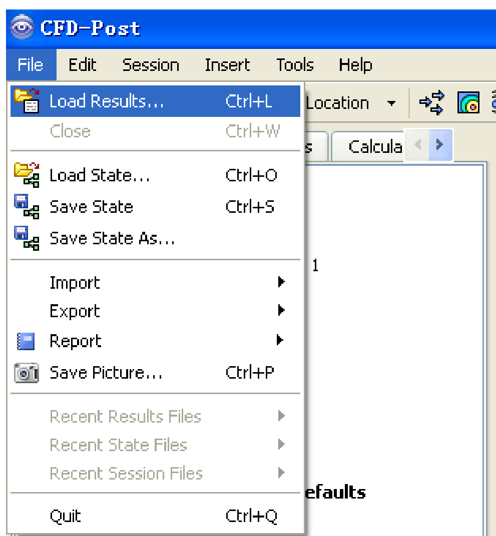


图 3-52 导入结果文件

2）如图 3-53 所示，选择文件“room.cas”，单击“OK”按钮导入该文件。

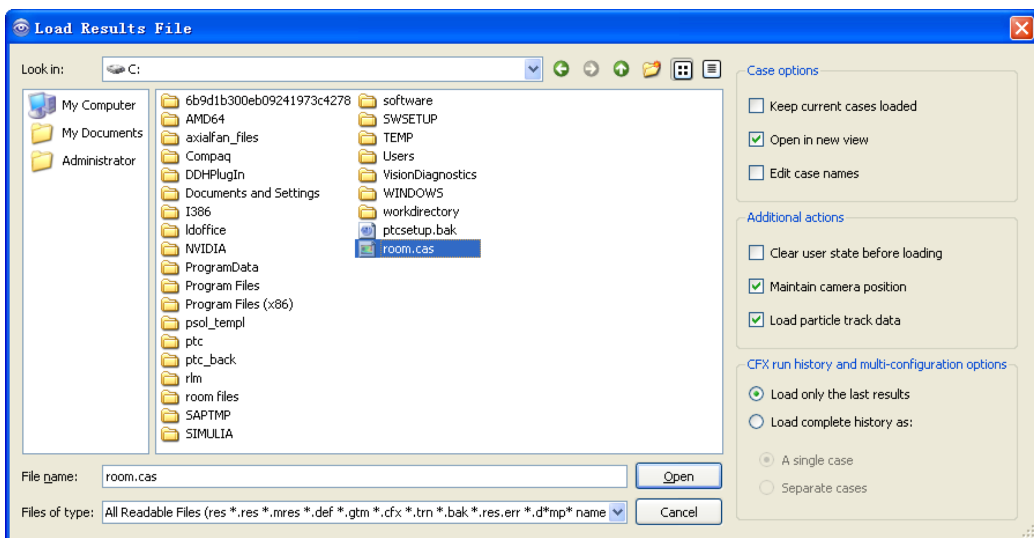


图 3-53 导入文件“room.cas”

3）如图 3-54 所示，弹出“Global Variable Ranges”对话框，提示用户注意变量范围的预设置方法。单击“OK”按钮确认操作。

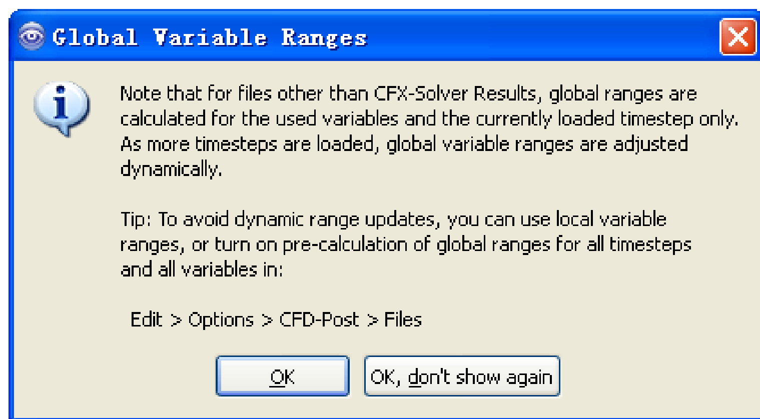


图 3-54 “Global Variable Ranges”对话框

4）视图区打开边框模式的计算模型，同时左侧项目树出现所有边界的列表，如图 3-55 所示。

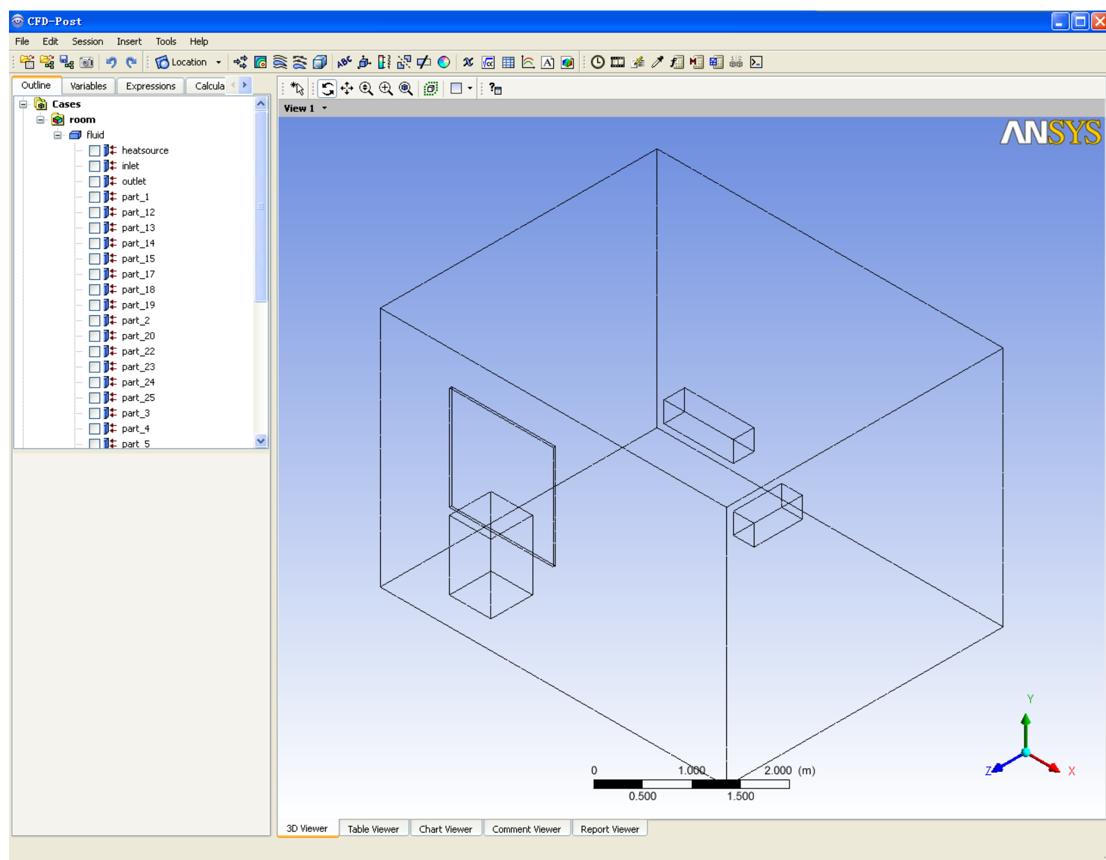


图 3-55 打开边框模式的计算模型

5）单击工具栏中的按钮，绘制流场中的流线图。在弹出的对话框中输入文件名“Streamline room”，如图 3–56 所示。

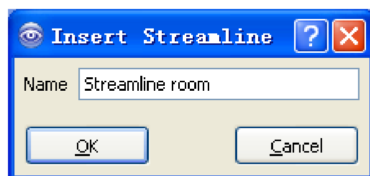


图 3–56 绘制流线图

6）单击“OK”按钮，展开“Streamline room”的属性栏。将“Start From”项设置为“inlet”边界，将“# of Points”项设置为 50，单击“Apply”按钮确认操作。视图区中绘制完成的建筑物内流线图如图 3–57 所示。

用户还可以从项目树中找到新创建的“Streamline room”项。

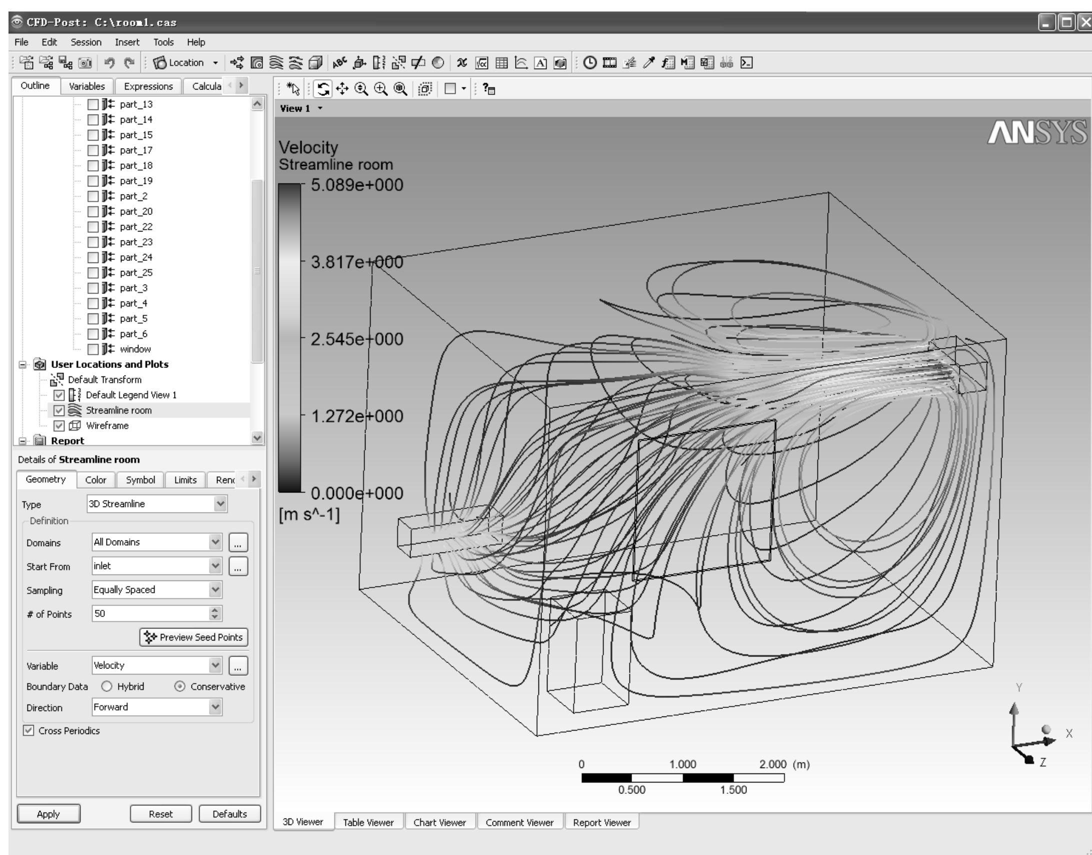


图 3–57 建筑物内流线图

3.4.2 室内温度分布

1）取消选择项目树中的“Streamline room”项，视图区不再显示流线图。

2）如图 3–58 所示，选择工具栏中的[Location]>[Plane]命令，建立室内温度分布截面。

3）如图 3–59 所示，在弹出的“Insert Plane”对话框中保持默认文件名，单击“OK”按钮确认操作。



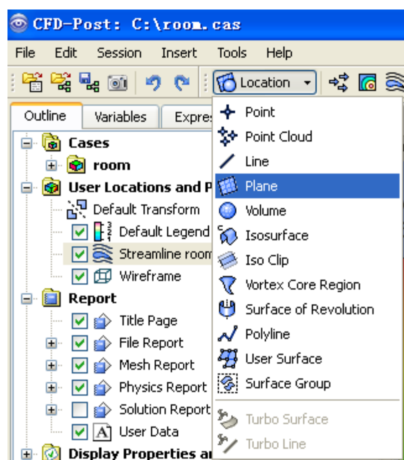


图 3-58　建立室内温度分布截面

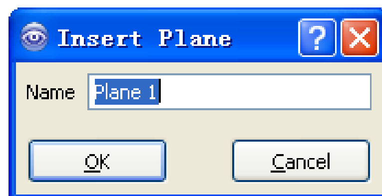


图 3-59　保持默认文件名

4）在新建的“Plane 1”属性栏中将“Method”项设置为“ZX Plane”，将“Y”值设置为 1[m]（即室内离地高度为 1m 的水平面）。单击“Apply”按钮，视图区生成“Plane 1”，室内温度分布截面如图 3-60 所示。

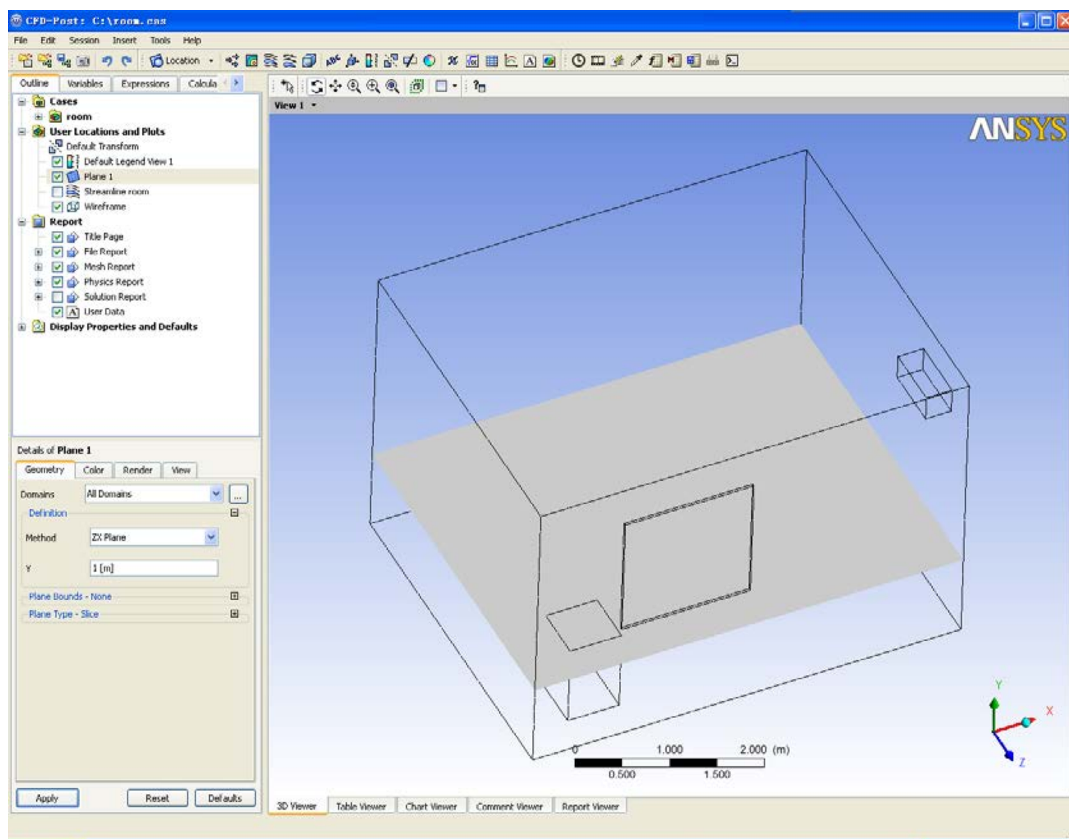


图 3-60　室内温度分布截面

5）生成温度分布云图。单击工具栏中的按钮，在弹出的“Insert Contour”对话框中输入文件名“Contour Plane 1”，如图 3-61 所示。



图 3-61 输入文件名

6）设置温度分布云图的相关参数。将“Contour Plane 1”属性栏中的“Locations”项设置为“Plane 1”边界，将“Variable” 项设置为“Temperature”，将“Range”设置为“Local”，将“# of Contours”设置为 50。单击“Apply”按钮，视图区生成的温度分布云图如图 3-62 所示。

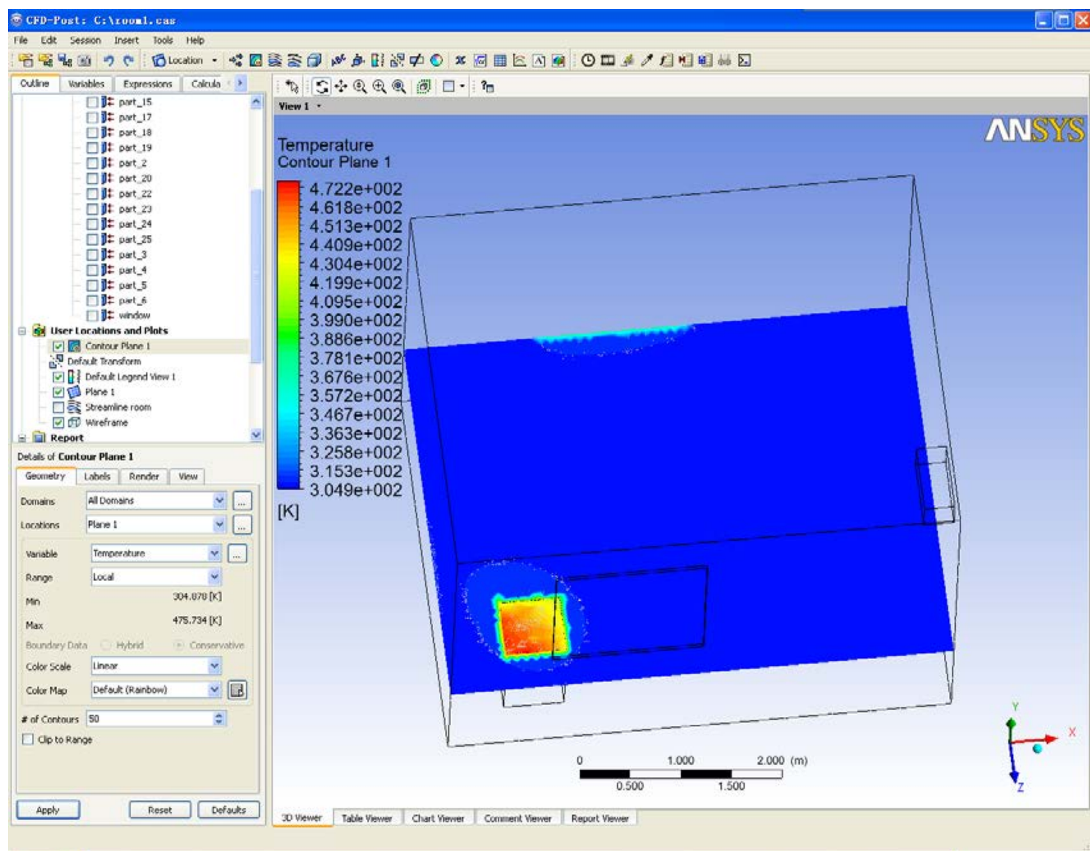


图 3-62 视图区生成的温度分布云图

7）图 3-62 中的截面温度梯度不是很明显，这是由于截面的大部分温度都处于温度图例的较低部分。将“Contour Plane 1”属性栏中的“Range”更改为“User Specified”，将



“Min”设置为 305[K]，将“Max”设置为 320[K]。单击“Apply”按钮，显示范围修改后的温度分布云图如图 3-63 所示。图 3-63 中的截面温度梯度较明显，可知风口下区域的气流温度相对于热源处低 2～3 K。

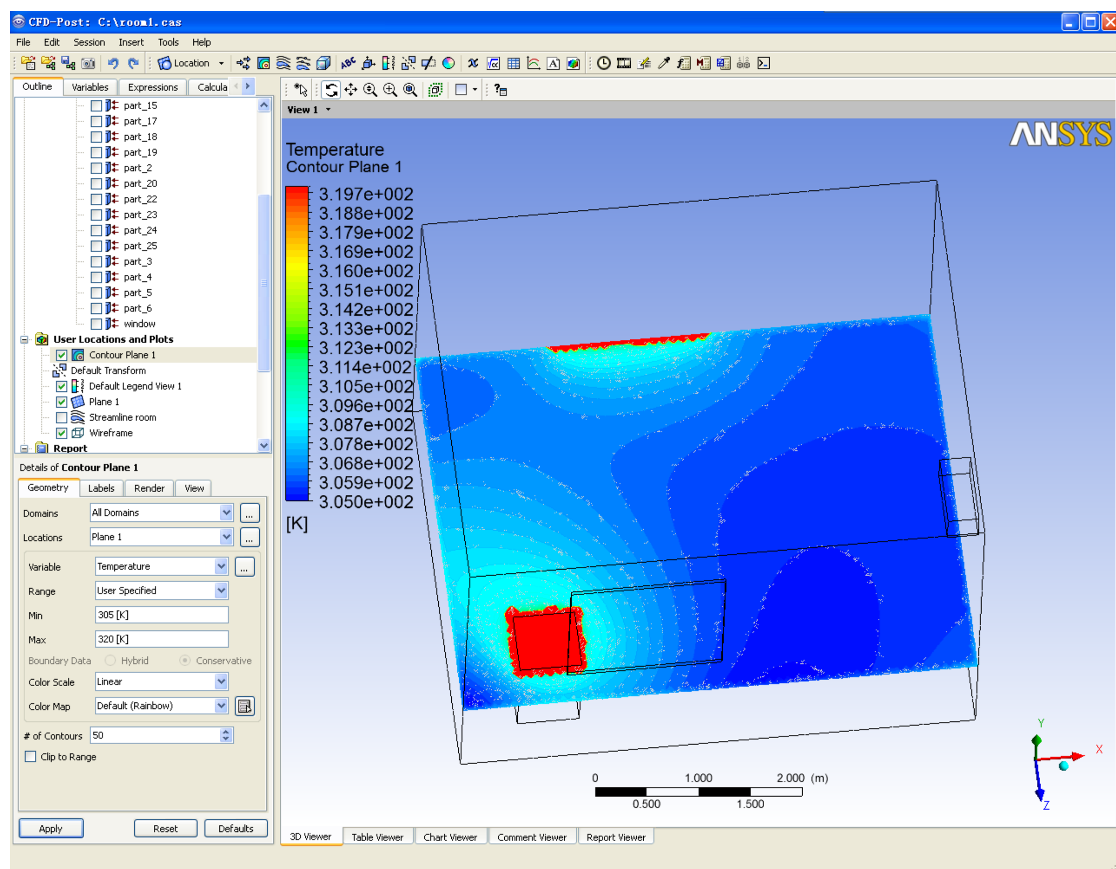


图 3-63　显示范围修改后的温度分布云图

8）生成其他区域的温度分布云图。单击工具栏中的按钮，在弹出的“Insert Contour”对话框中输入文件名“Contour Window”，单击“OK”按钮，建立窗口区域的温度分布云图，如图 3-64 所示。



图 3-64　建立窗口区域的温度分布云图

9）将“Contour Window”属性栏中的“Locations”项设置为“window”边界，将“Variable”项设置为“Temperature”，将“Range”设置为“User Specified”，将“Min”设置为 310[K]，将“Max”设置为 318[K]。单击“Apply”按钮，窗口区域的温度分布云图如图 3-65 所示。可以看出，窗户靠近热源左半区域（以下图定左右）的温度比右半区域的温度高 2K 左右。

10）保存后处理文件。如图 3-66 所示，选择[File]> [Save State]菜单命令。在“Save State”对话框中输入文件名“room.cst”，单击“Save”按钮保存文件，如图 3-67 所示。

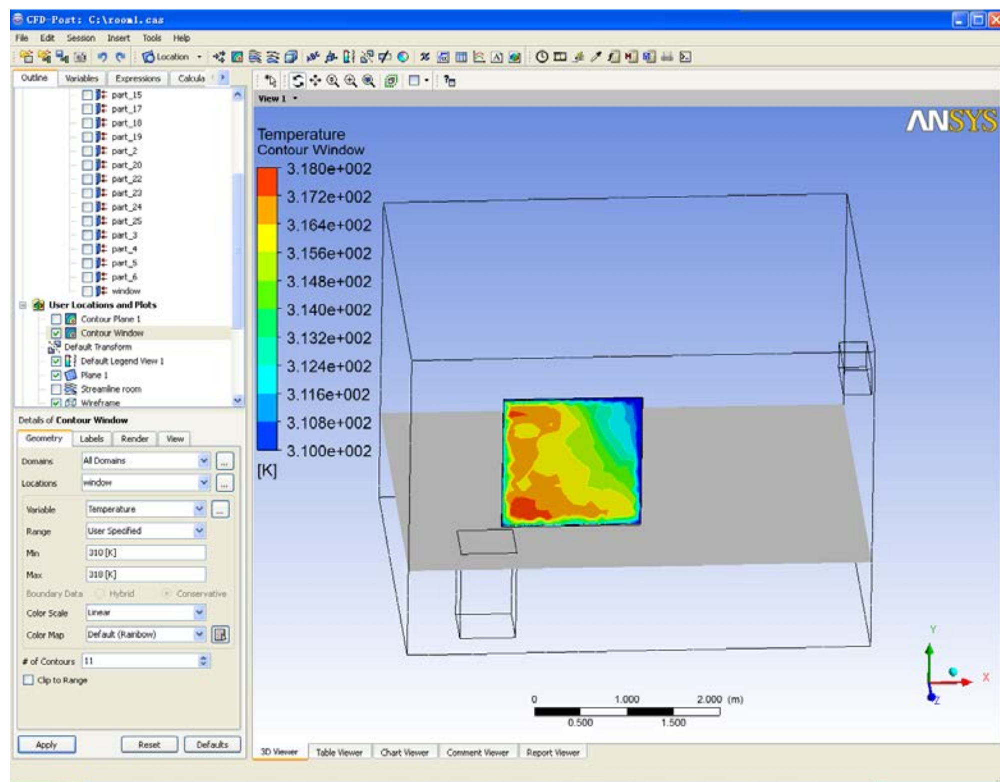


图 3-65　窗口区域的温度分布云图

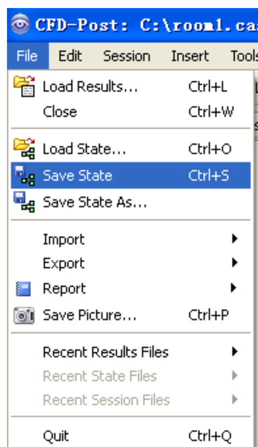


图 3-66　保存后处理文件

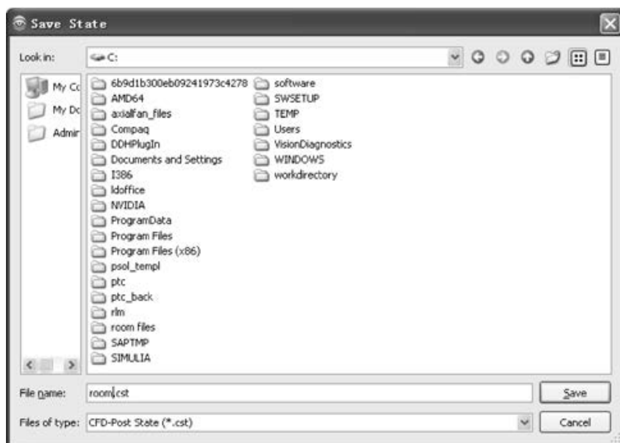


图 3-67　输入文件名

3.5　无内热源的室内空气流场计算

1）为了比较有、无内热源的室内空气流场，下面对上例中的热源进行重新设置。单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“heatsource”边界。接着单击“Edit...”按钮，在弹出的“Wall”对话框中选择 Tab 页“Thermal”，然后选择“Thermal Conditions”栏

下的“Heat Flux”项，将“Heat Flux（w/m2）”项的值改为 0，即取消室内热源，如图 3-68 所示。单击“OK”按钮退出。

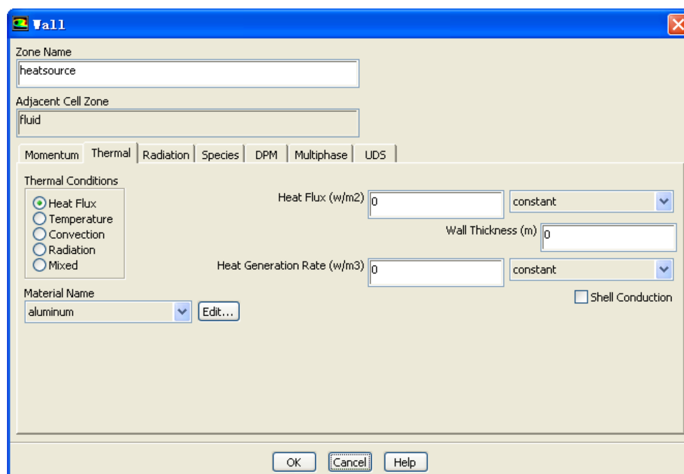


图 3-68　取消室内热源

2）其他设置不变，再次初始化和计算本算例，保存文件为“room-noheat.cas”和“room-noheat.dat”。

3）按相同的方法建立计算结果的温度场分布，分别如图 3-69 和图 3-70 所示。

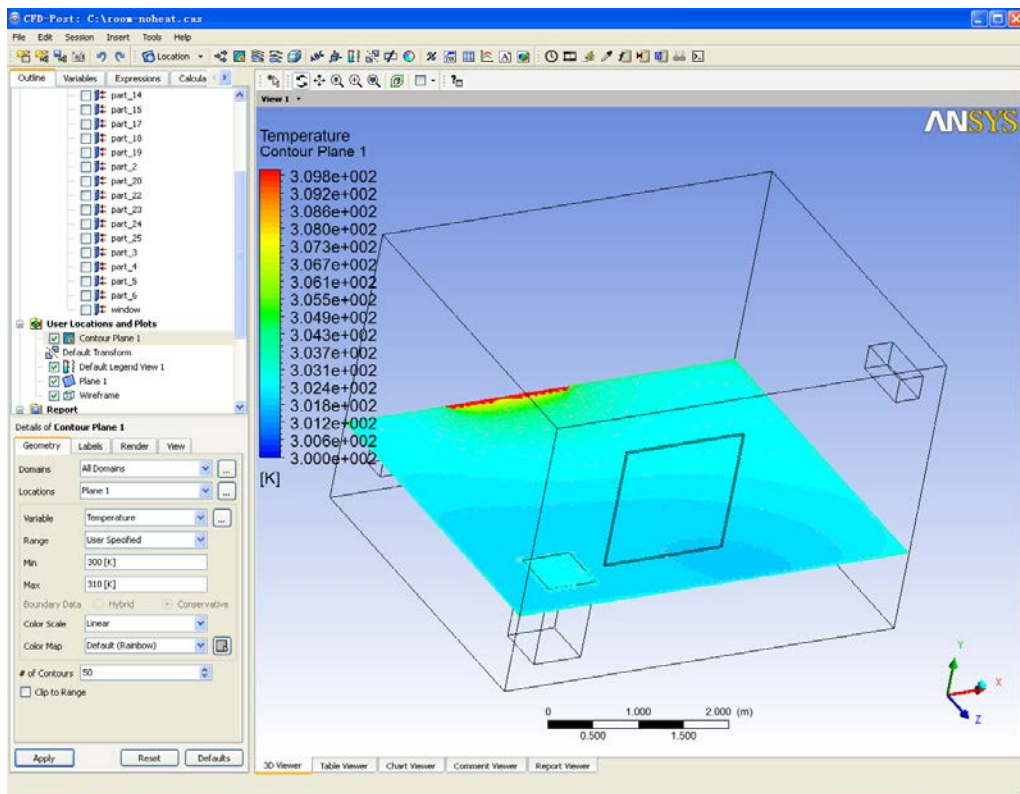


图 3-69　Contour Plane 1

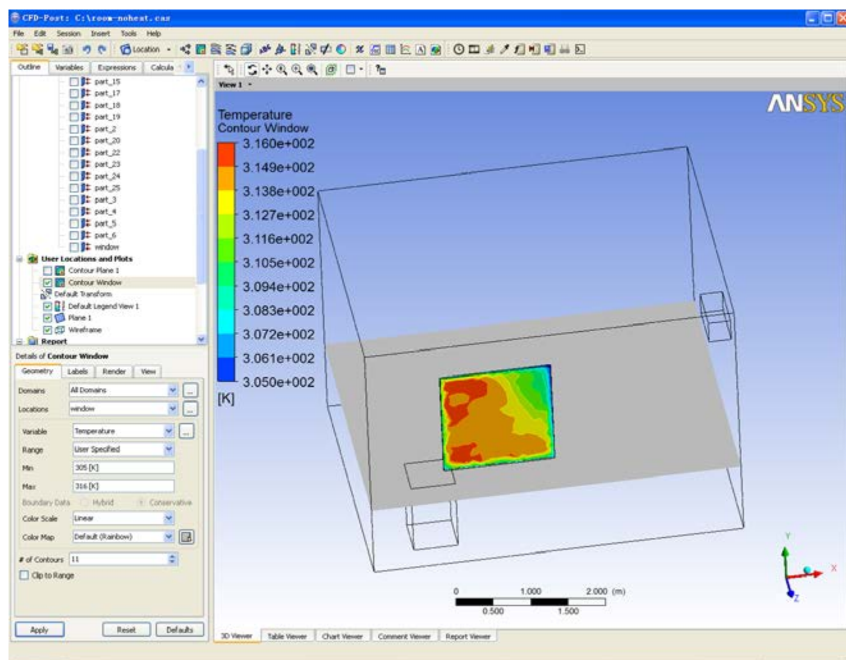


图 3-70　Contour Window

4）求取窗户边界上的平均温度。如图 3-71 所示，切换到左侧“Calculator”页，双击“Function Calculator”工具，在其属性栏中选择 Function 栏为“areaAve”项，即面积平均方式；选择“Location”栏为“window”项；选择“Variable”栏为“Temperature”项。单击“Calculate”按钮，“Results”栏出现面积平均的窗户表面平均温度为 313.826K。

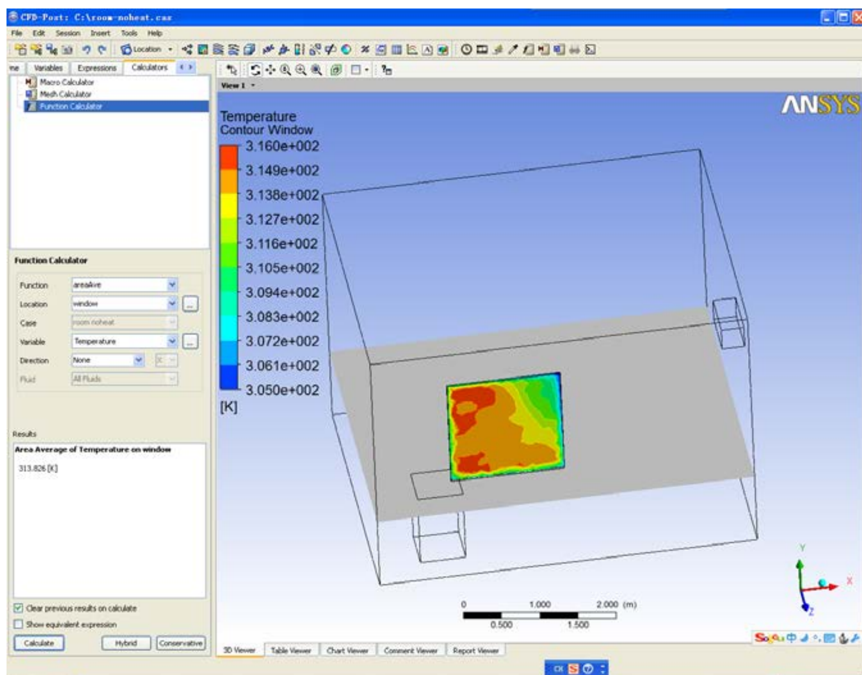


图 3-71　求取窗户边界上的平均温度

5）按照同样的方法计算，得到有内热源情况下窗户边界上的平均温度为 315.512K。

可以看出，无内热源情况下窗户边界上的平均温度比有内热源情况下低 2 K 左右。

6）选择[File]>[Save State]菜单命令，在“Save State”对话框中输入文件名“room noheat.cst”，单击“Save”按钮保存文件，如图 3-72 所示。

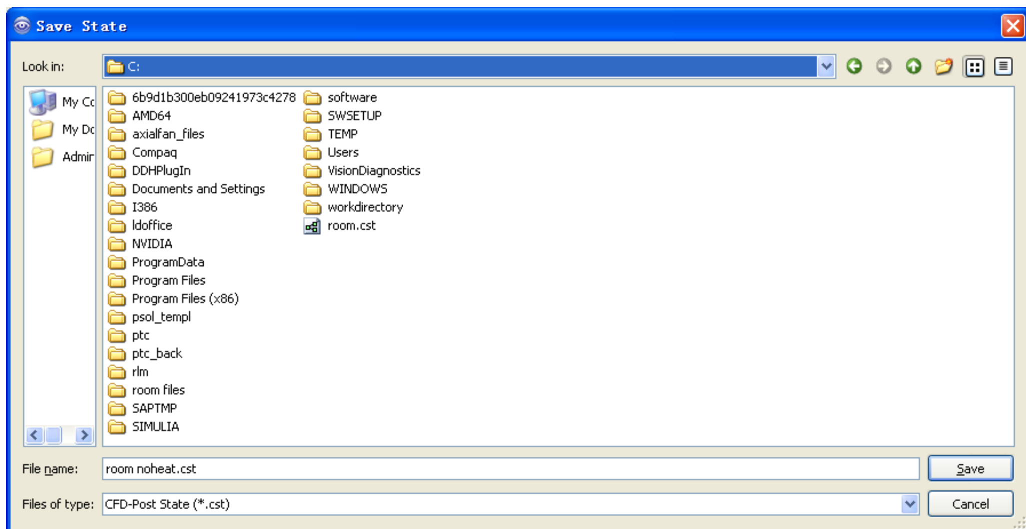


图 3-72　保存文件“room noheat.cst”

第 4 章 高速列车空气动力学性能计算

本章主要内容：

本章主要介绍明线运行、横风运行和明线交会 3 种工况下，高速列车空气动力学性能计算的前处理、计算求解设置及后处理技巧。

本章学习目标：

✧ ICEM-CFD 划分列车网格。
✧ 高速列车明线运行工况空气动力学性能计算求解方法。
✧ 高速列车横风运行工况空气动力学性能计算求解方法。
✧ 高速列车明线交会工况空气动力学性能计算求解方法。
✧ 滑移网格的设置方法。

4.1 计算实例及空气动力学专业术语

由于运行速度较高，高速列车比普速列车的空气阻力大很多，因而有必要研究高速列车的空气动力学性能。本章以一个示例性的高速列车头车模型进行高速动车外流场计算与分析，如图 4−1 所示。

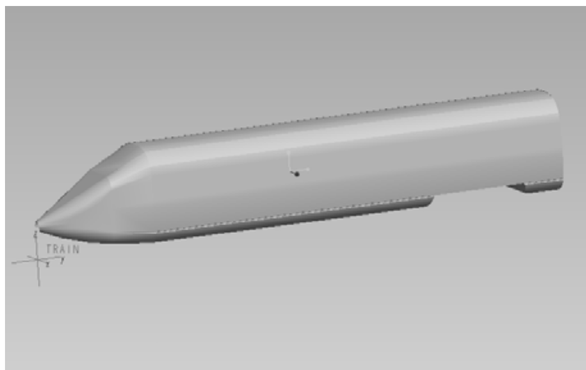


图 4−1 头车模型

本文涉及的高速动车组及空气动力学性能方面的专业术语包括以下几个。

头车：列车前进运行时，编组在列车最前端的第一辆车。

风挡：车辆之间连接部件，形式有内风挡、半外封闭风挡和全封闭风挡。

横风：风向与列车运行方向垂直的环境风。

阻力系数：

$$c_x = \frac{F_x}{qS_x} \tag{4-1}$$

升力系数：

$$c_y = \frac{F_y}{qS_x} \tag{4-2}$$

横向力系数：

$$c_z = \frac{F_z}{qS_x} \tag{4-3}$$

动压：

$$q = \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{4-4}$$

式中　v——列车速度；

F_x——列车空气阻力，即列车压差阻力和列车空气摩擦阻力之和；

F_y——列车空气升力；

F_z——列车空气横向力；

S_x——参考面积，指列车最大横截面积。

对于露天运行的高速列车，其流场计算区域理论上应该是无限大，但由于实际计算中受计算资源的限制，只能取有限空间。选取计算区域的基本原则是不影响列车附近流体的流动，即计算区域的边界离列车表面要足够远，使列车运行所产生的气流对区域边界的流体流动的影响很小。

4.2　明线运行气动性能计算

4.2.1　高速列车空气动力学计算模型的建立

1．导入模型

1）通过开始菜单，启动 ICEM 软件，如图 4-2 所示。

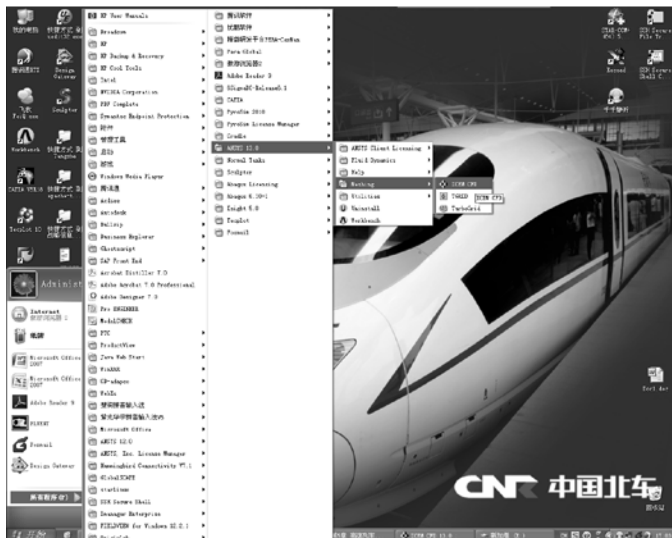


图 4-2　启动 ICEM 软件

2）选择[File]>[Import Geometry]>[STEP/IGES]菜单命令，选择计算模型的打开格式，如图 4-3 所示。由图 4-3 可知，软件包括多种可导入格式，可支持多种 CAD 软件输出的文件格式。

3）打开计算模型。在弹出的“Select STEP/IGES files”对话框中选择“train.IGS”项，如图 4-4 所示。单击“打开”按钮确认操作。



图 4-3 选择计算模型的打开格式

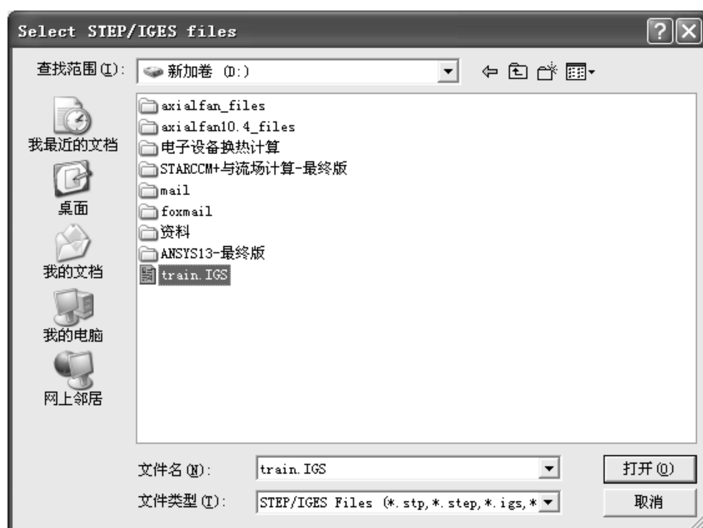


图 4-4 打开计算模型

4）Tetin File 名默认为 train.tin，单击“OK”按钮，稍后会出现如图 4-5 所示的“Create a new project”对话框。

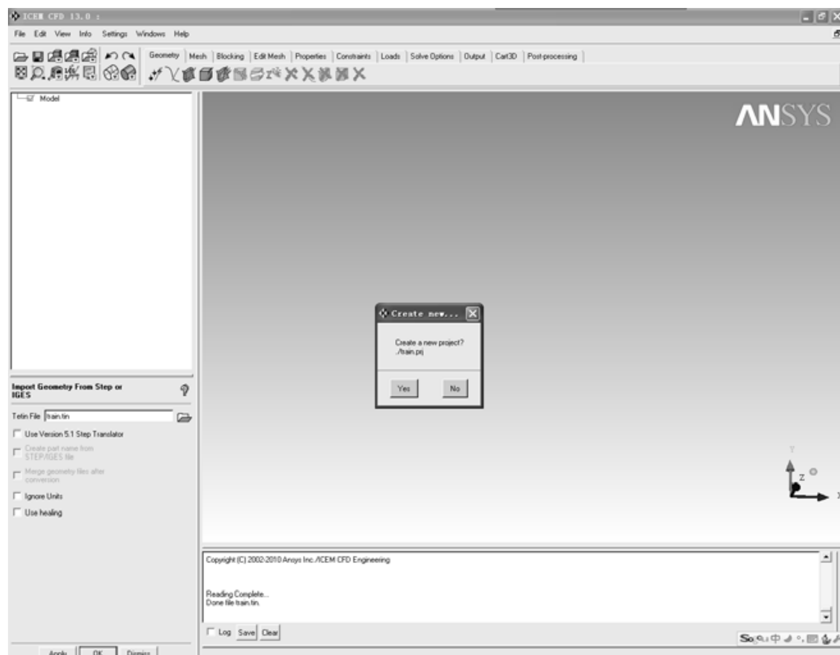


图 4-5 “Create a new project”对话框

5）单击“Yes”按钮，视图区出现导入的列车头车模型，如图 4-6 所示。

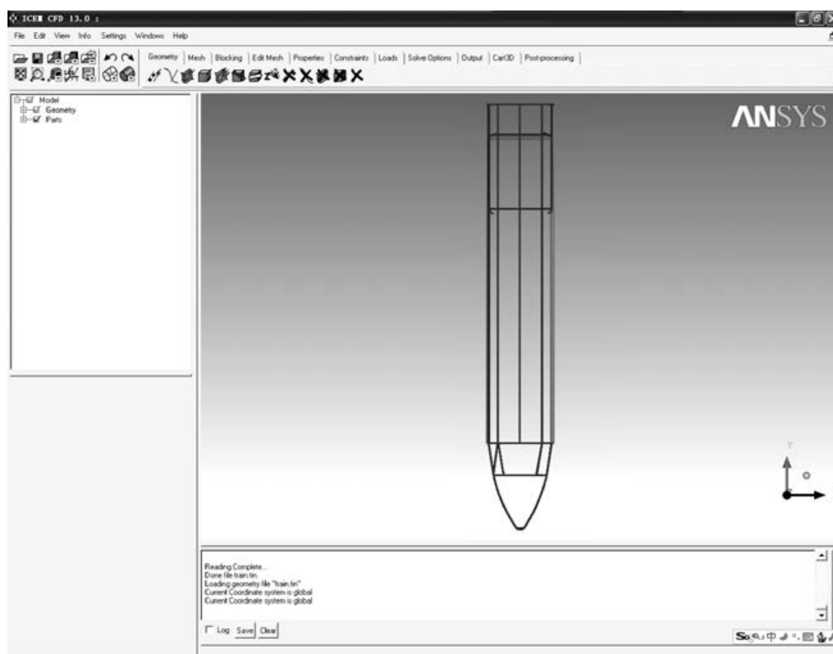


图 4-6　列车头车模型

6）勾选[Model]>[Geometry]>[Surfaces]项，视图区头车模型的线框模式图如图 4-7 所示。可以看出，为表示各面，车体模型线条增加。

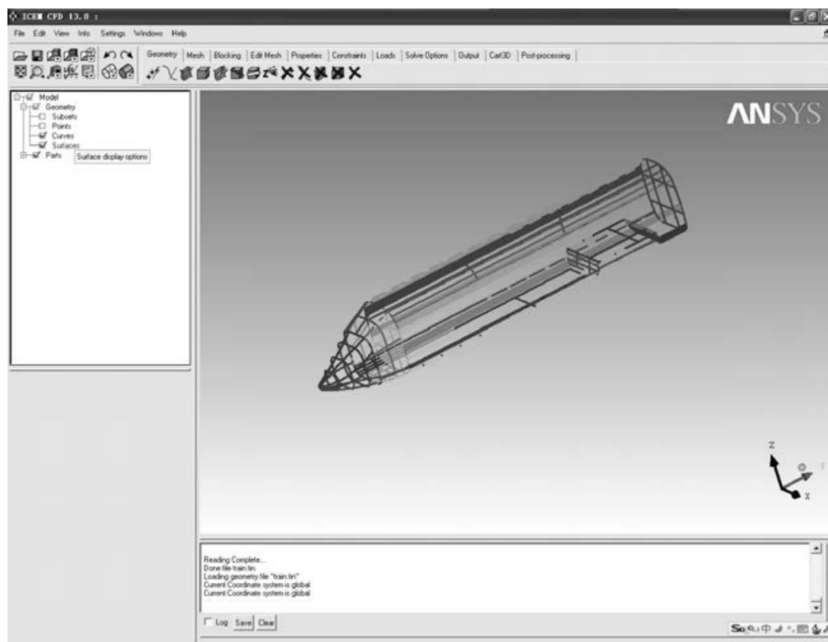


图 4-7　头车模型的线框模式图

2．检查模型及修改模型

1）检查模型面网格。单击工具栏中的[Geometry]>[Repair Geometry]（即项），选择属性栏中的按钮。在“Tolerance”项中输入2，如图4-8所示。单击“Apply”按钮确认操作。

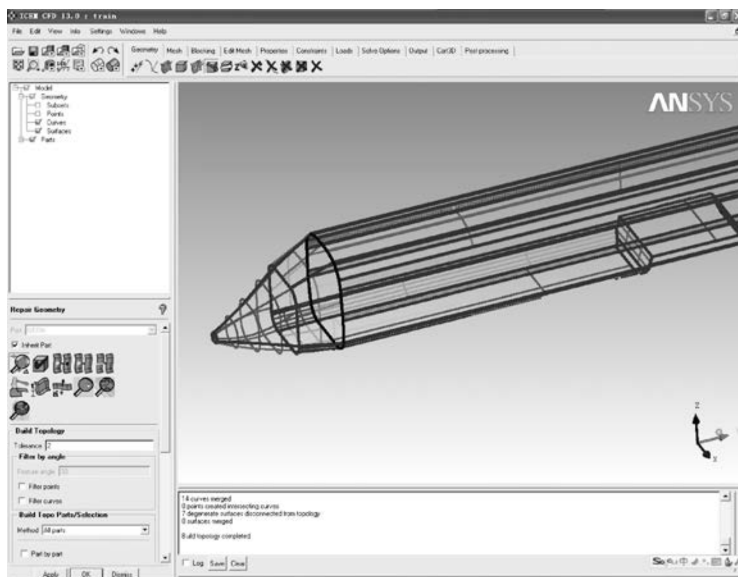


图4-8 检查模型面网格

2）单击工具栏中的[Geometry]>[Delete Surfaces]（即项），视图区鼠标变为十字形式，如图4-9所示。可以看出，图4-9中所指区域存在一个多余面（位于车体表面内部）。

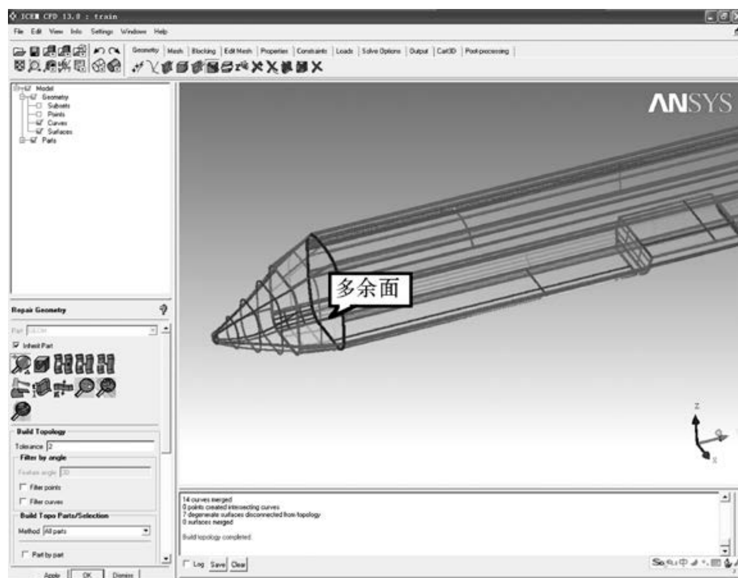


图4-9 多余面

3）单击该多余面。图4-10中增加的黑色线条对应的面就是所选中的多余面。

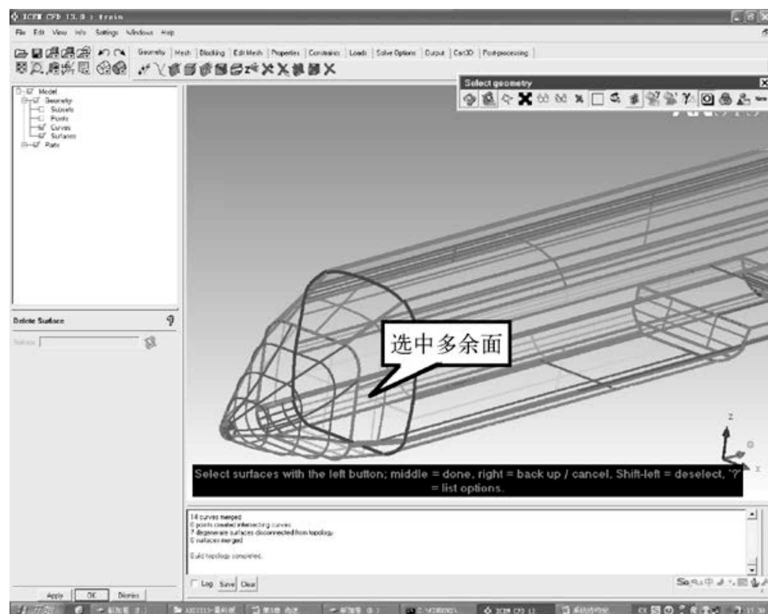


图 4-10　选中多余面

4）单击鼠标中键，多余面被删除，如图 4-11 所示。

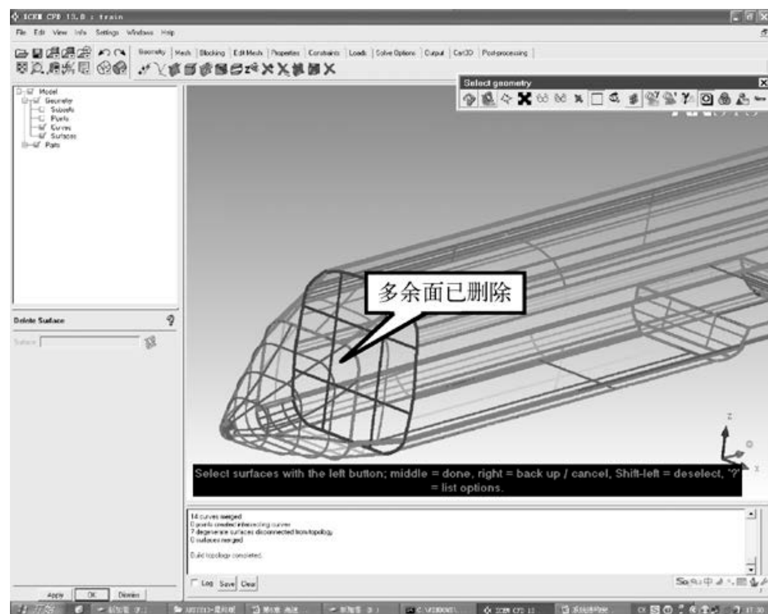


图 4-11　删除多余面

3．建立计算域

1）单击工具栏中的[Geometry]>[Create/Modify Surface]（即项），选择视图区中的图标，如图 4-12 所示。在“Create Std Geometry”中保持选择“Box”项，在“Box Dimensions”栏中保持“Method”项为“Specify”。

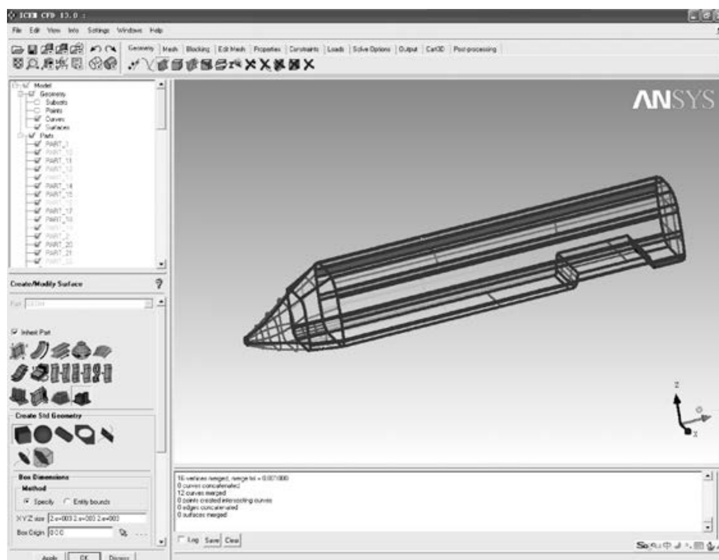


图 4-12 建立计算域

2）单击属性栏“BOX Origin”项右侧的按钮，视图区出现“Select location”工具栏，如图 4-13 所示。选择工具栏上的按钮，单击如图 4-14 所示的点，显示出该点的坐标值 1199.35 15401.5 327.692。

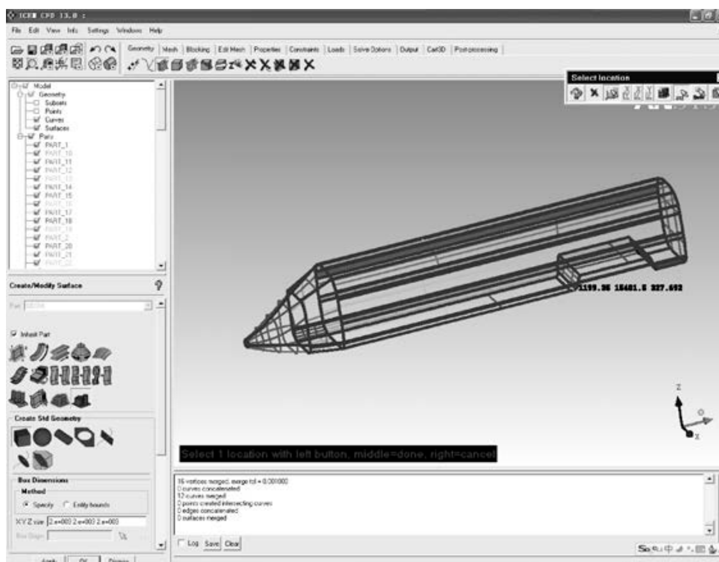


图 4-13 显示点的坐标值

3）鉴于本节列车长度为 20m 左右，且车头鼻端处 *Y* 轴坐标值约等于零，计算域沿车长方向（*Y* 轴方向）取 5 倍车长，沿车宽方向取 30m 对称分布，沿车高方向取 20m（地面高度设为 *Z* 轴坐标值约等于零）。在属性栏中输入以下信息：

XYZ size：30000 100000 20000

BOX Origin：−15000 −30000 0

创建好的计算域如图 4−14 所示。

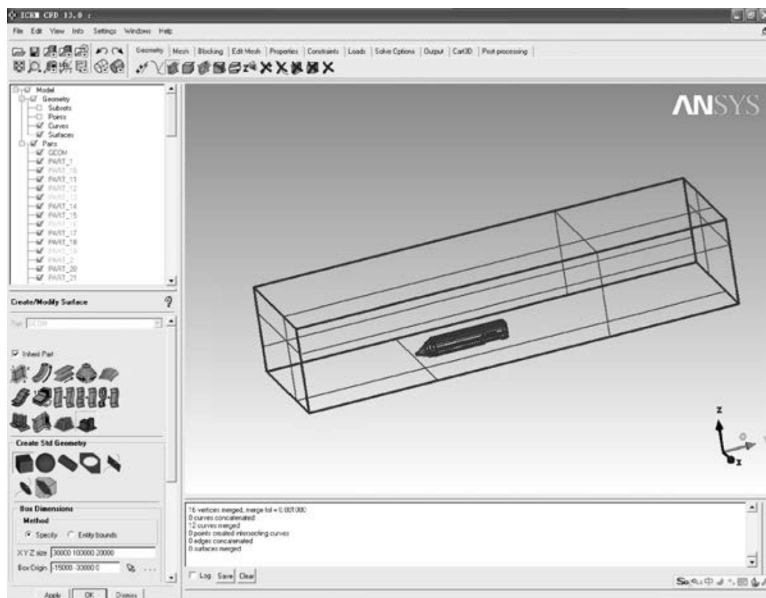


图 4−14 创建好的计算域

4．创建流体域 Body 项

1）单击工具栏中的[Geometry]>[Create Body]（即项），选择视图区中的图标，如图 4−15 所示。

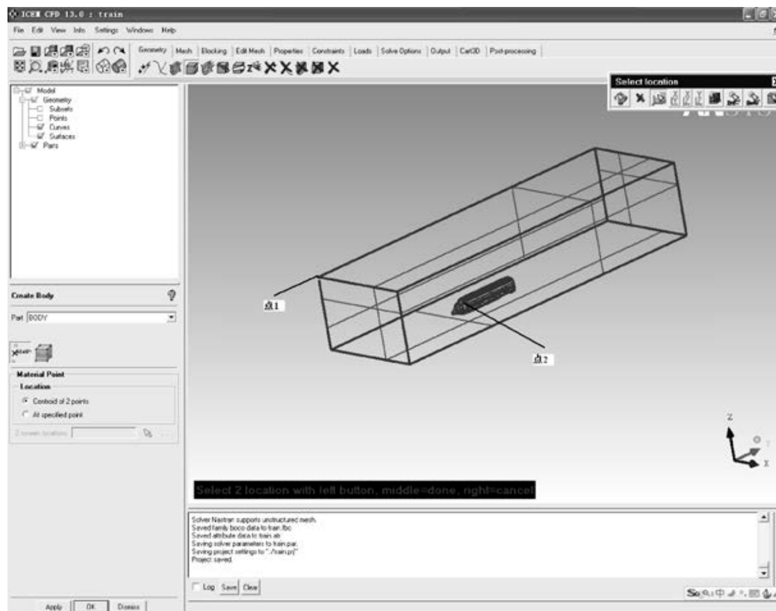


图 4−15 创建 Body 项

2）选择图 4-15 中的点 1 和点 2，单击鼠标中键确认操作。新生成的 Body 点如图 4-16 所示。

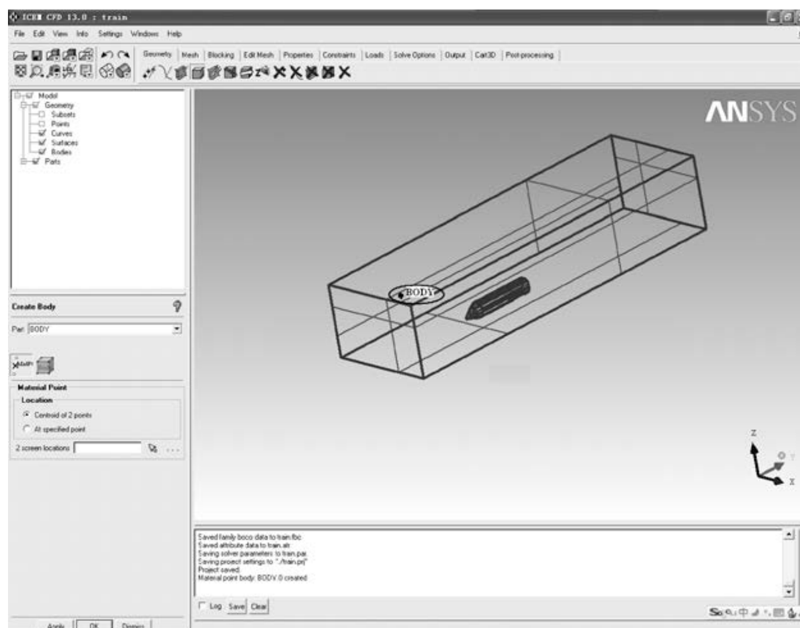


图 4-16　新生成的 Body 点

5．创建 Part 项

1）勾选[Model]>[Geometry]>[Points]项，取消选择[Model]>[Geometry]下的其余项和[Model] >[Parts]>[Body]项。视图区中仅显示出所有点，如图 4-17 所示。

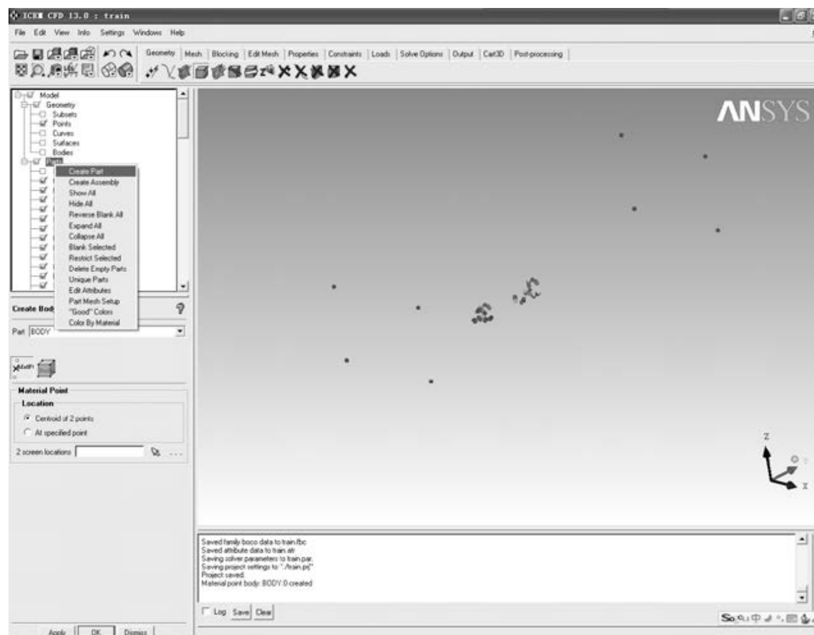


图 4-17　显示所有点

2）右键单击[Model] >[Parts]，选择“Create Part”项。修改属性栏中的 Part 名为“Points”。单击属性栏中的项，视图区出现“Select geometry”工具栏，如图 4−18 所示。

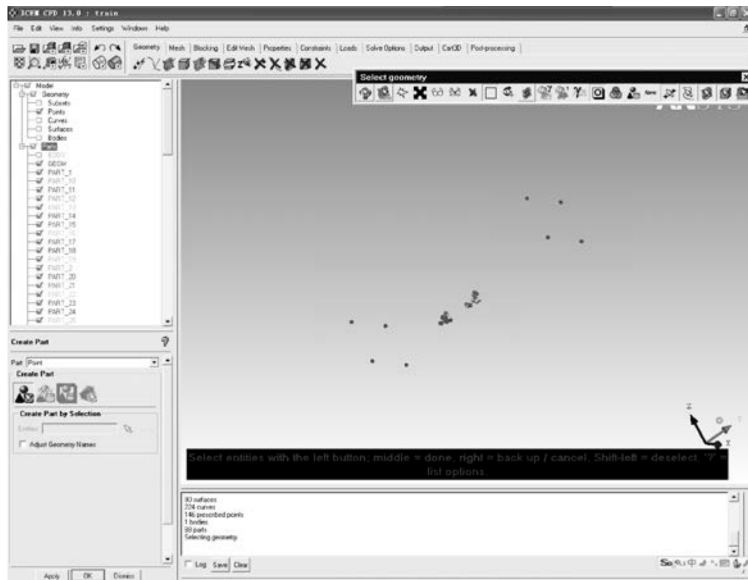


图 4−18　选中所有点

3）单击“Select geometry”工具栏中的“”按钮（选择所有可见几何体），或单击键盘中的“A”键，选择视图区中不同颜色的所有点。单击鼠标中键确认操作，视图区中的所有点显示为一种颜色，同时出现[Model]>[Parts]>[POINT]项，如图 4−19 所示。单击鼠标中键，生成名为“POINT”的 Part 项。

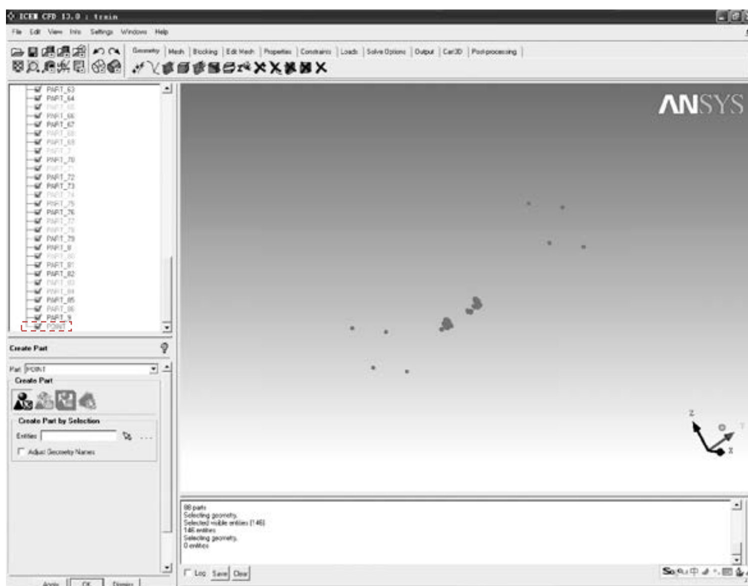


图 4−19　生成“POINT”项

4）勾选[Model]>[Geometry]>[Curves]项，取消选择[Model]>[Geometry]下的其余项，视图区中仅显示出所有曲线。

5）修改属性栏中的 Part 名为“Curve”。单击属性栏中的项，视图区出现“Select geometry”工具栏。同样，单击“Select geometry”工具栏中的“”按钮，或单击键盘中的“A”键，选择视图区中不同颜色的所有曲线。单击鼠标中键确认操作，视图区中的所有曲线显示为一种颜色，同时出现[Model]>[Parts]>[CURVE]项，如图 4-20 所示。

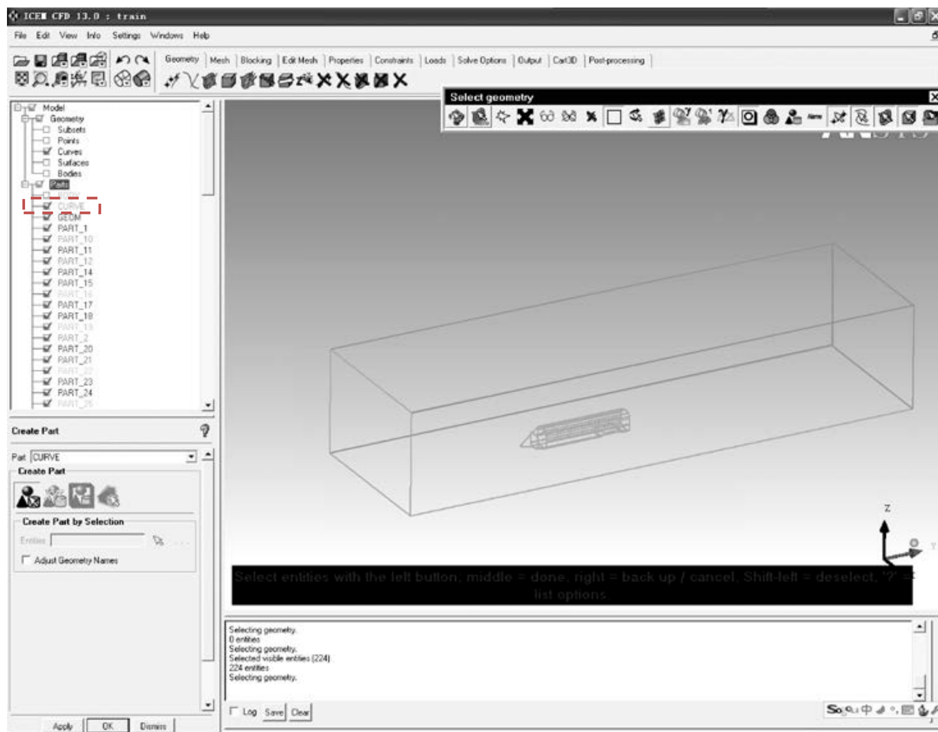


图 4-20 显示所有曲线

6）勾选[Model]>[Geometry]>[Surfaces]项，取消选择[Model]>[Geometry]下的其余项，视图区中仅显示出所有曲面。

7）修改属性栏中的 Part 名为“Surface”。单击属性栏中的项，视图区出现“Select geometry”工具栏。同样，单击“Select geometry”工具栏中的“”按钮，或单击键盘中的“A”键，全部选择视图区中不同颜色的所有曲线。单击鼠标中键确认操作，视图区中的所有曲线显示为一种颜色，同时出现[Model]>[Parts]>[SURFACE]项（绿色字体），如图 4-21 所示。注意，视图区中的所有面也均为绿色，这是 ICEM 软件的方便之处。

6．设置计算域边界

1）保持选择[Model]>[Geometry]>[Surfaces]项。右键单击[Model] >[Parts]，选择“Create Part”项。修改属性栏中的 Part 名为“INLET”，选择如图 4-22 所示的面作为进口面，单击鼠标中键确认操作，同时出现[Model]>[Parts]>[INLET]项。

注意：一般选中的面均表示为黑色。

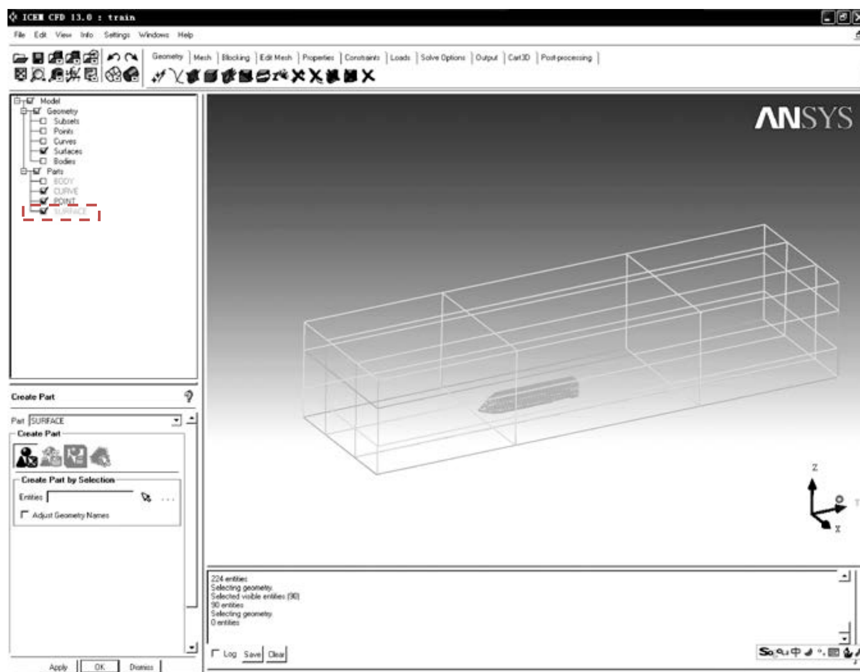


图 4–21　生成“SURFACE”项

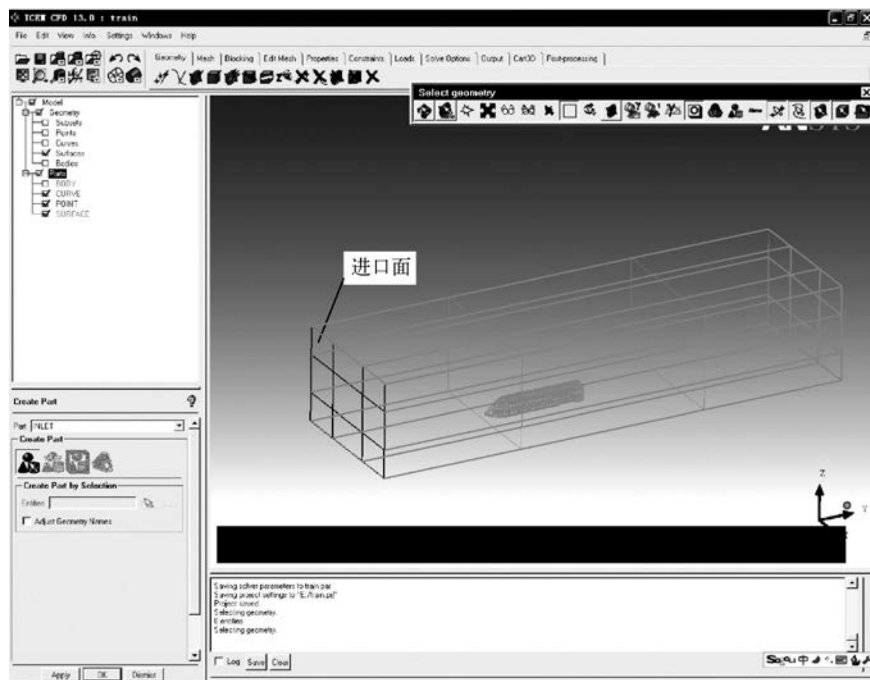


图 4–22　选择进口面

2）修改属性栏中的 Part 名为“OUTLET”，选择如图 4–23 所示的面作为出口面，单击鼠标中键确认操作，同时出现[Model]>[Parts]>[OUTLET]项。

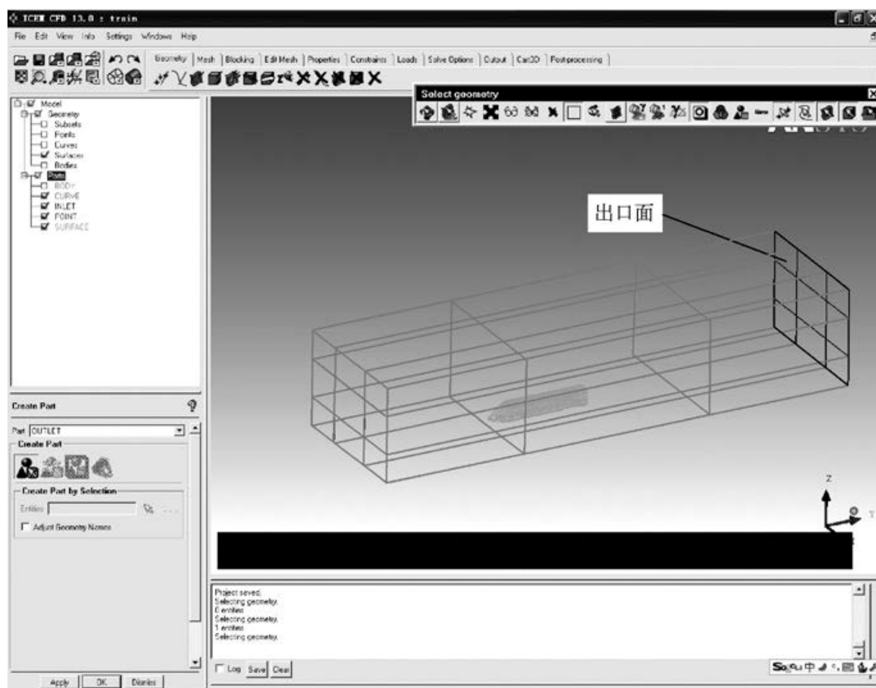


图 4-23 选择出口面

3）修改属性栏中的 Part 名为“GYM”，选择如图 4-24 所示的面作为虚拟的计算域表面，单击鼠标中键确认操作，同时出现[Model]>[Parts]>[GYM]项。

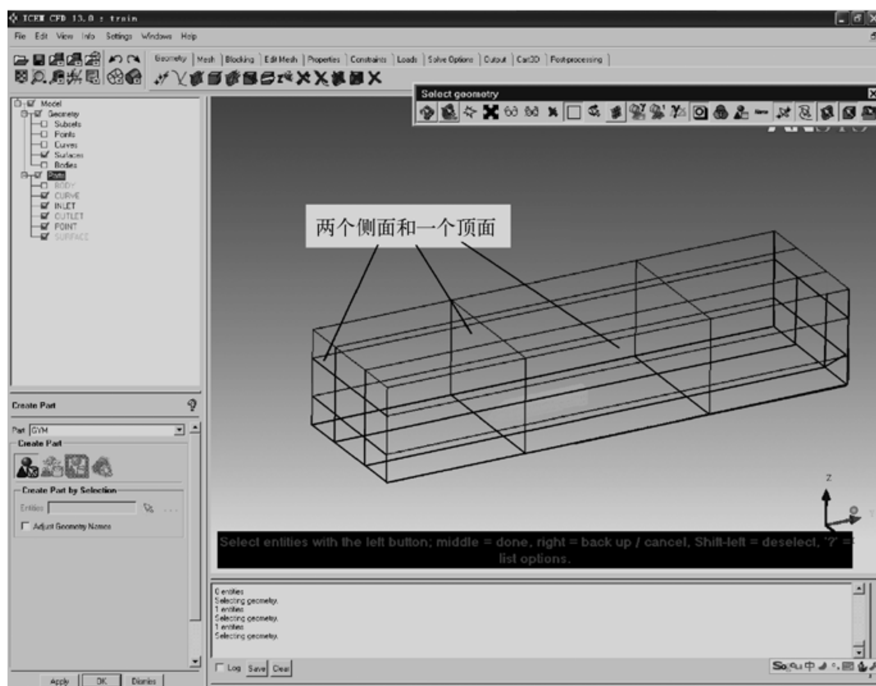


图 4-24 选择计算域表面

4）修改属性栏中的 Part 名为“GROUND”，选择如图 4-25 所示的面作为计算域的地面，单击鼠标中键确认操作，同时出现[Model]>[Parts]>[GROUND]项。

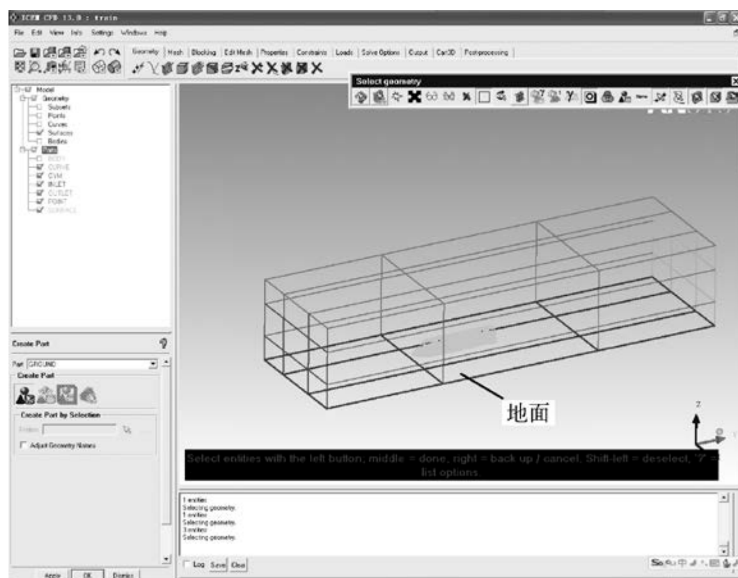


图 4-25　选择地面

5）仅选择[Model]>[Parts]>[SURFACE]项。修改属性栏中的 Part 名为“TRAIN”，单击属性栏中的项，视图区出现“Select geometry”工具栏。同样，单击“Select geometry”工具栏中的“”按钮，或单击键盘中的“A”键，选择图 4-26 中的所有面作为车体表面，单击鼠标中键确认操作，同时[Model]>[Parts]>[SURFACE]项更名为[Model]>[Parts]>[TRAIN]项。

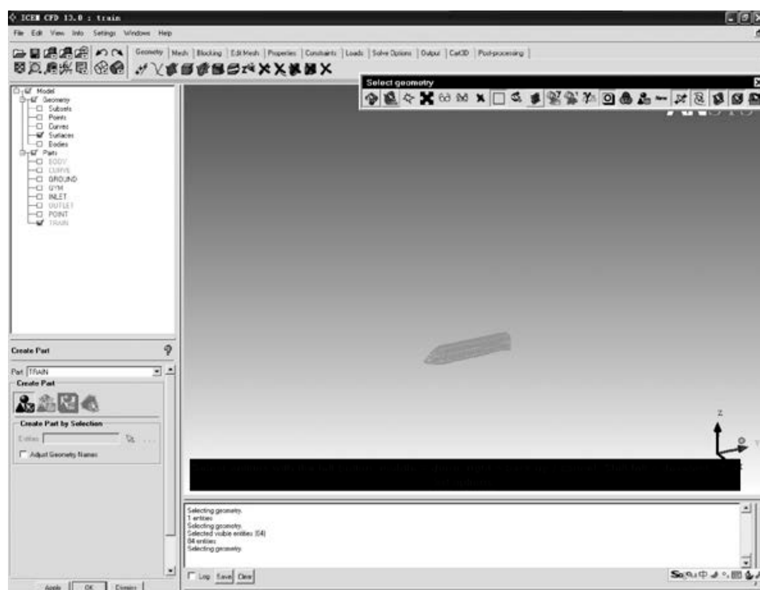


图 4-26　选择车体表面

7．网格划分

1）单击工具栏按钮[Mesh]>[Global Mesh Setup]（），选择属性栏中的[Global Mesh Parameters]按钮（）。如图 4-27 所示，保持“Global Element Scale Factor”项的值为 1.0，在“Global Element Seed Size”项中输入“2000.0”（软件默认网格尺寸按 mm 计），单击“OK”按钮确认操作。

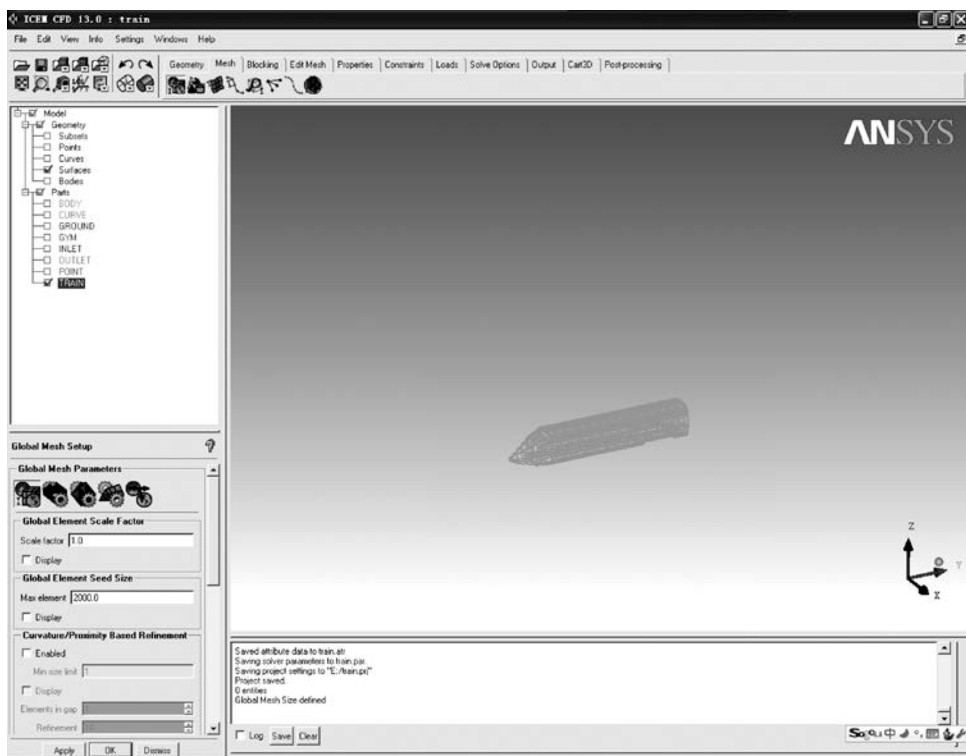
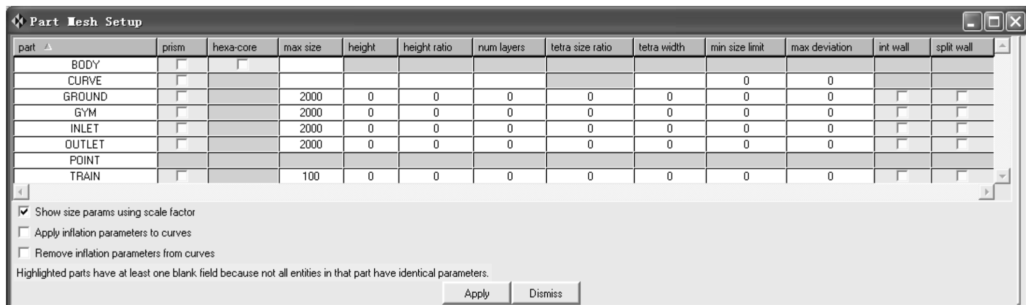


图 4-27　输入网格总体尺寸

2）输入各边界表面的最大尺寸。如图 4-28 所示，单击工具栏[Mesh]>[Part Mesh Setup]（）项，在弹出的“Part Mesh Setup”对话框的“max size”一栏中输入各 part 的最大尺寸，“TRAIN”项要求车体表面网格最大为“100”，在“GROUND”、“GYM”、“INLET”、“OUTLET”项均输入“2000”。


Part Mesh Setup

part	prism	hexa-core	max size	height	height ratio	num layers	tetra size ratio	tetra width	min size limit	max deviation	int wall	split wall
BODY												
CURVE									0	0		
GROUND			2000	0	0	0	0	0	0	0		
GYM			2000	0	0	0	0	0	0	0		
INLET			2000	0	0	0	0	0	0	0		
OUTLET			2000	0	0	0	0	0	0	0		
POINT												
TRAIN			100	0	0	0	0	0	0	0		

Show size params using scale factor
Apply inflation parameters to curves
Remove inflation parameters from curves
Highlighted parts have at least one blank field because not all entities in that part have identical parameters.
Apply　Dismiss

图 4-28　输入各边界表面的最大尺寸

3）进行网格划分。如图 4-29 所示，单击工具栏按钮[Mesh]>[Compute Mesh]（），在属性栏中采用默认的“Tetra/Mixed”网格划分方式，单击“Compute”按钮开始划分网格。右下角的进度条显示网格划分进度。

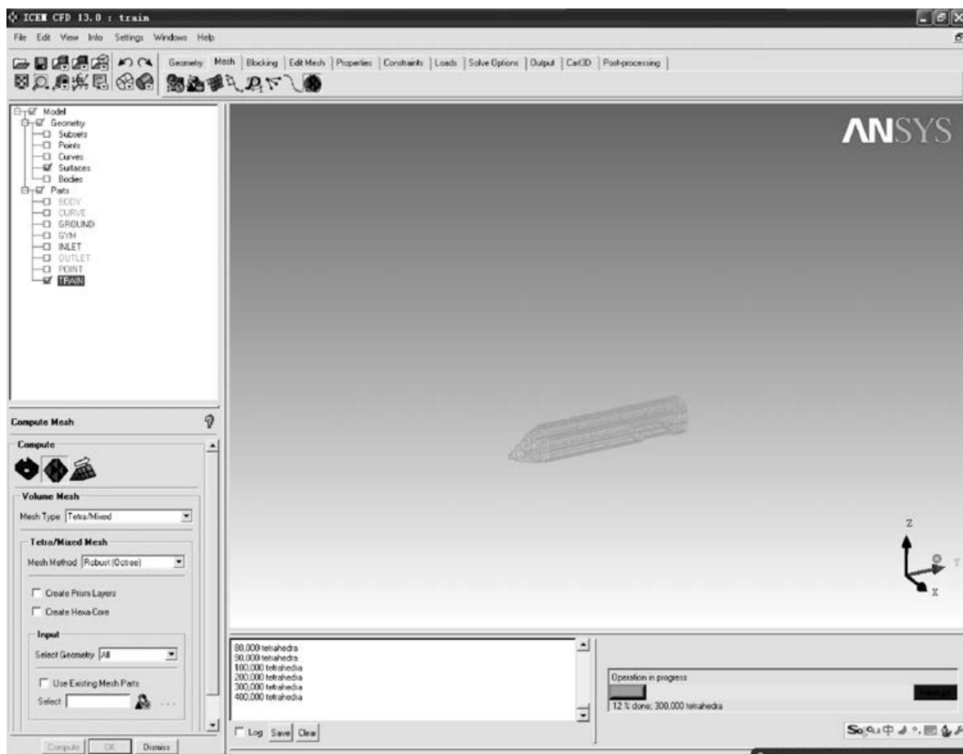


图 4-29　划分网格

4）网格划分完毕后，软件右下角的代码输出区显示网格量为 990197，如图 4-30 所示。划分完网格后应检查网格质量，确认无问题后方可输出网格。当没有网格错误与缺陷时，可以进行光顺化处理，以优化网格质量。一般要求体网格质量在 0.2～0.3 以上，此处不再详述。



图 4-30　网格量

8．输出网格

1）选择网格输出格式。单击工具栏按钮[Output]>[Solver Setup]（），在属性栏中选择“Output Solver”项为“Fluent_V6”，选择“Common Structural Solver”项为“ANSYS”，如图 4-31 所示。单击“OK”按钮确认操作。

2）单击工具栏按钮[Output]>[Solver Setup]（），弹出如图 4-32 所示的对话框，单击“Yes”按钮确认保存。

3）选择对应的“train.uns”文件，如图 4-33 所示。

4）在“Fluent V6”对话框中输入文件名“train”，如图 4-34 所示。这里的 Scaling 选项

指的是网格尺寸的缩放。

5）单击“Done”按钮确认保存。查看保存路径，可以找到网格文件“train.msh”。

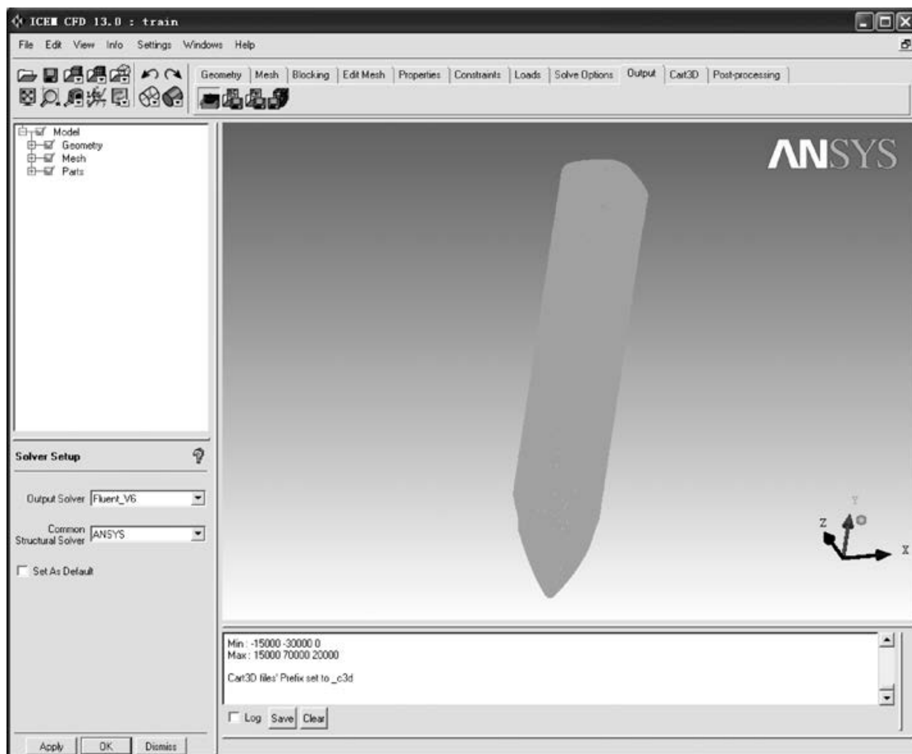


图 4-31 选择网格输出格式

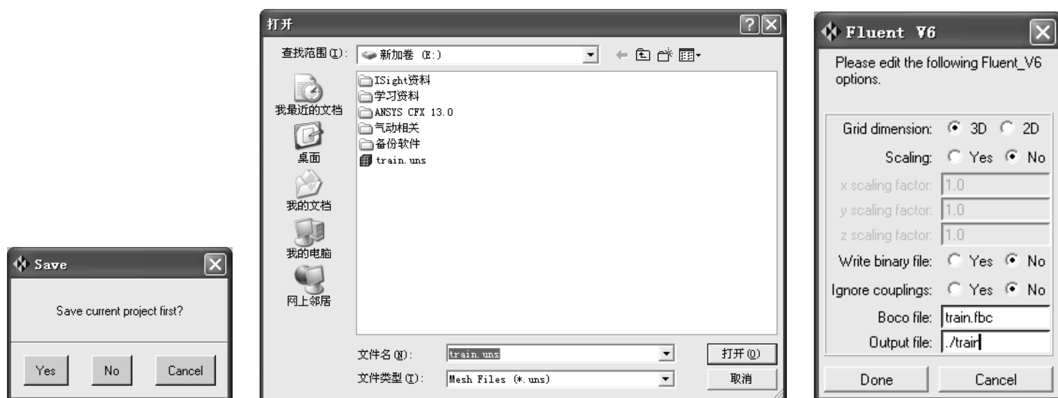


图 4-32 保存文件　　图 4-33 选择对应的“train.uns”文件　　图 4-34 输入文件名

4.2.2 计算模型的设置

单击[开始]菜单，打开 FLUENT 软件启动界面，选择“并行计算->2 核”方式，如图 4-35 所示。



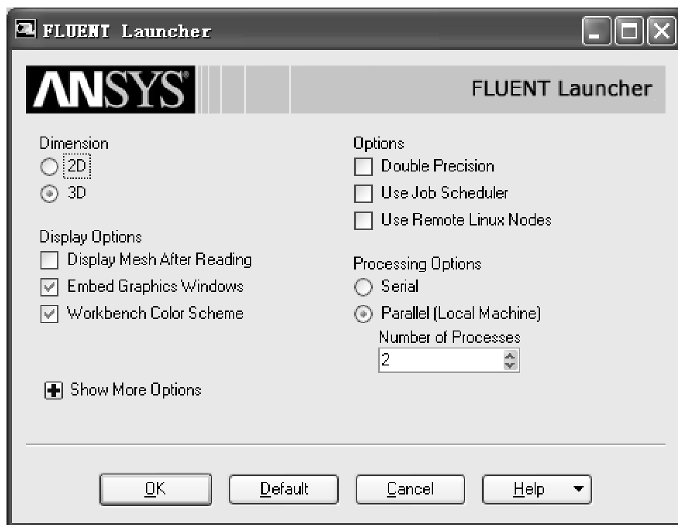


图 4-35　选择“并行计算->2 核”方式

1．导入网格文件

1）选择[File]>[Read]>[Mesh...]菜单命令，导入网格，如图 4-36 所示。

2）选择网格文件“train.msh”，单击“OK”按钮打开该网格文件，如图 4-37 所示。

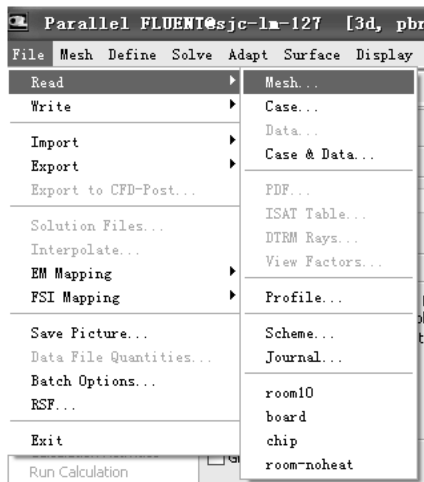


图 4-36　导入网格

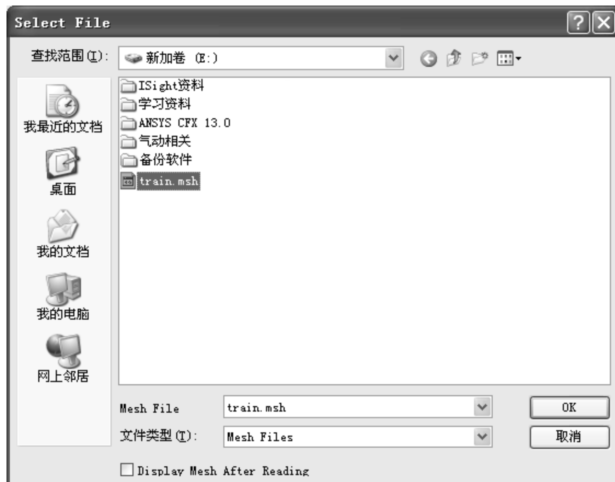


图 4-37　选择网格文件

3）显示网格。选择[Display]> [Mesh...]菜单命令，打开“Mesh Display”对话框。如图 4-38 所示，单击“Mesh Display”对话框中的“Display”按钮，视图区出现计算模型的网格。可以看到，软件将进口处显示为蓝色，将出口处显示为红色。单击“Close”按钮退出。

4）单击左侧项目树[Problem Setup]>[General]项属性栏中的“Scale...”按钮，弹出如图 4-39 所示的“Scale Mesh”对话框。

5）选择缩放单位。由于 ICEM 软件划分网格时采用的默认单位是 mm，而 FLUENT 采

用的默认单位是 m，因此此处需要对网格进行缩放。如图 4-40 所示，将对话框右侧的“Mesh Was Created In”项设置为“mm”，“Scaling Factors”下的各项值则相应地由 1 改变为 0.001。

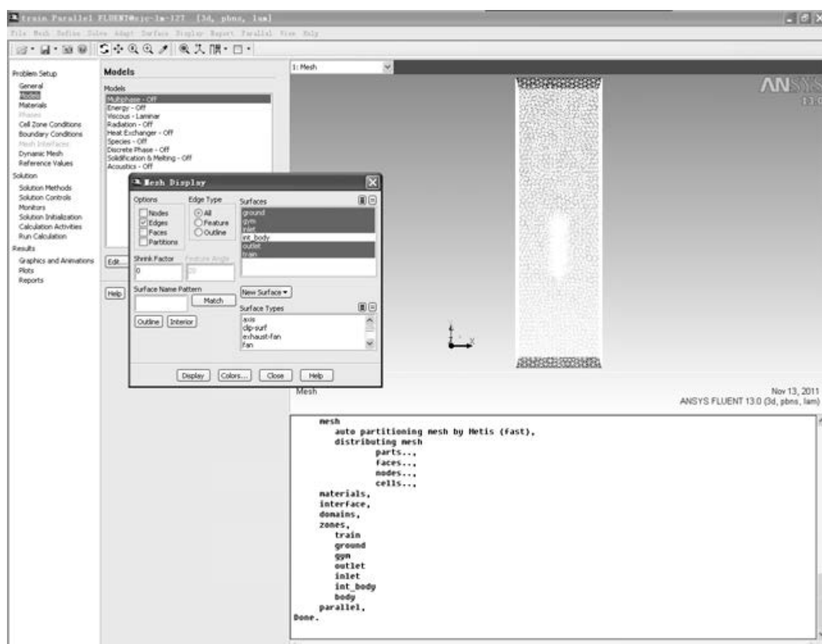


图 4-38 显示网格

6）单击“Scale”按钮，计算域的坐标范围变换为图 4-41 中的形式。单击“Close”按钮退出。

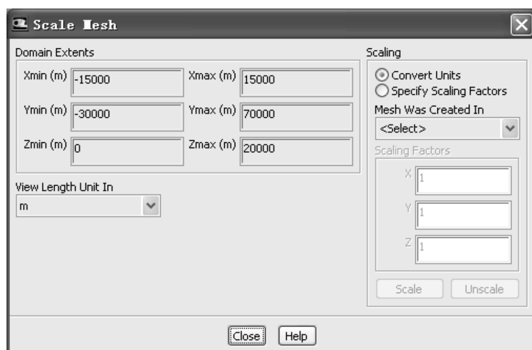


图 4-39 “Scale Mesh”对话框

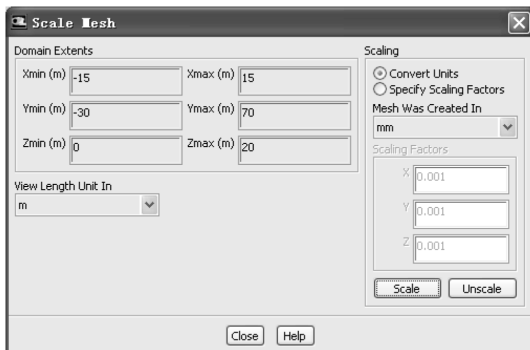


图 4-40 选择缩放单位

2. 设置计算模型

1）默认选择[Problem Setup]>[General]项属性栏中的各项设置。

2）更改湍流模型。选择[Problem Setup]>[Models]项，双击其属性栏中的“Viscous-Laminar”项，如图 4-41 所示。

3）在打开的“Viscous Model”对话框中选择“k-epsilon(2 eqn)”项，对话框展开为如

图 4-42 所示的形式。保持默认设置，单击“OK”按钮返回。

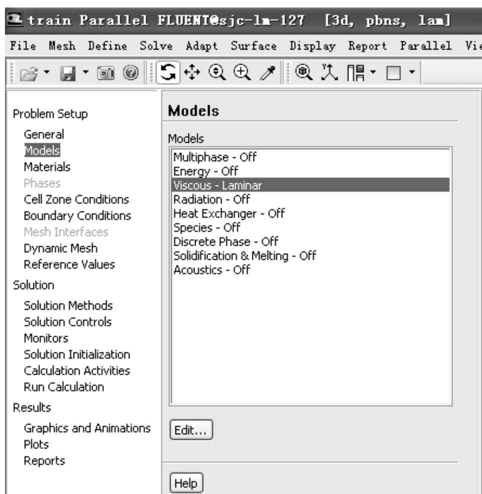


图 4-41　更改湍流模型

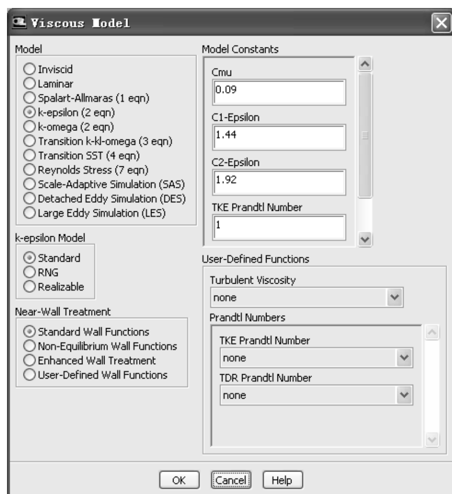


图 4-42　选择“k-epsilon(2 eqn)”模型

4）保持[Problem Setup]>[Materials]和[Problem Setup]>[Cell Zone Conditions]两项属性栏设置不变。

3．设置边界条件

1）设置进口条件。单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“inlet”边界，软件默认其为“velocity-inlet”条件。单击“Edit...”按钮，在弹出的“Velocity Inlet”对话框中输入速度值为 100m/s，如图 4-43 所示。单击“OK”按钮退出。

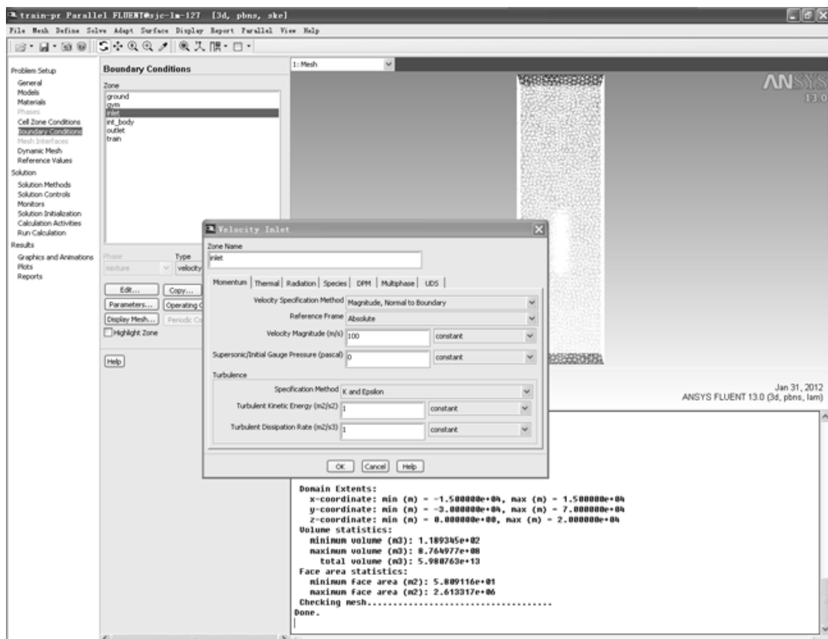


图 4-43　设置入口速度

2）设置出口条件。单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“outlet”边界，将其设置为“Pressure Outlet”条件。在如图 4-44 所示的“Pressure Outlet”对话框中保持默认设置，然后单击“OK”按钮返回。

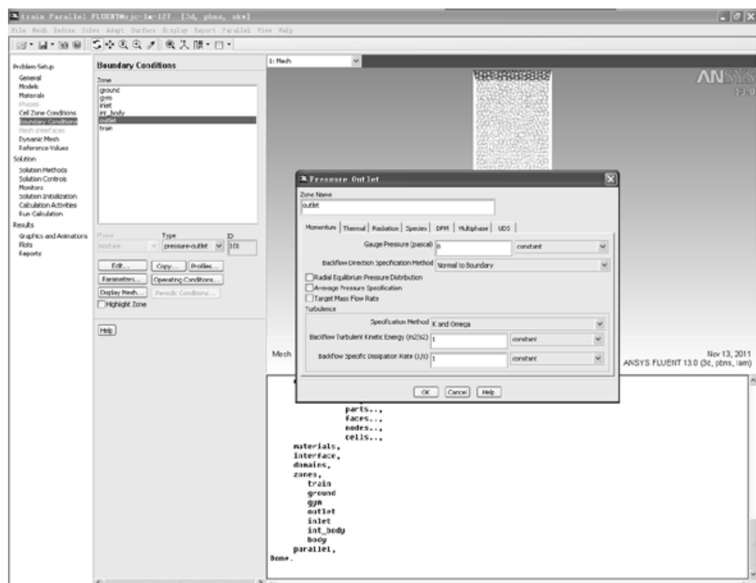


图 4-44　设置出口条件

3）设置计算域壁面条件。单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“gym”边界，将其设置为“wall”条件。在如图 4-45 所示的“Wall”对话框中选择“Specified Shear”项并设置“Roughness Constant”值为 0，然后单击“OK”按钮返回。

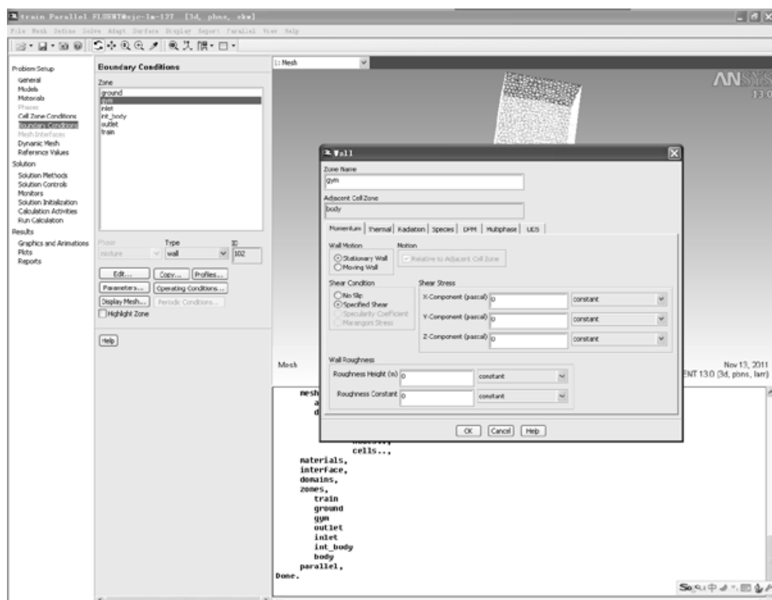


图 4-45　设置计算域壁面条件

4）设置地面滑移条件。单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“ground”边界，将其设置为“wall”条件。在如图 4-46 所示的“Wall”对话框中选择“Moving Wall”项，默认选择“Translational”方式，并设置“Speed（m/s）”为 100，设置“Direction”值为“0，1，0”，单击“OK”按钮返回。

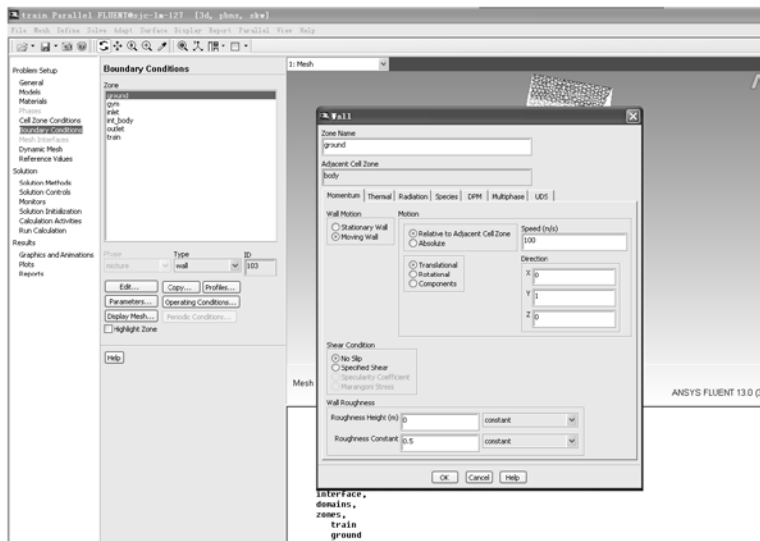


图 4-46　设置地面滑移条件

5）设置列车壁面条件。单击[Problem Setup]>[Boundary Conditions]项属性栏的“train”边界，将其设置为“wall”条件。在如图 4-47 所示的“Wall”对话框中选择“No Slip”项，保持默认设置，然后单击“OK”按钮返回。

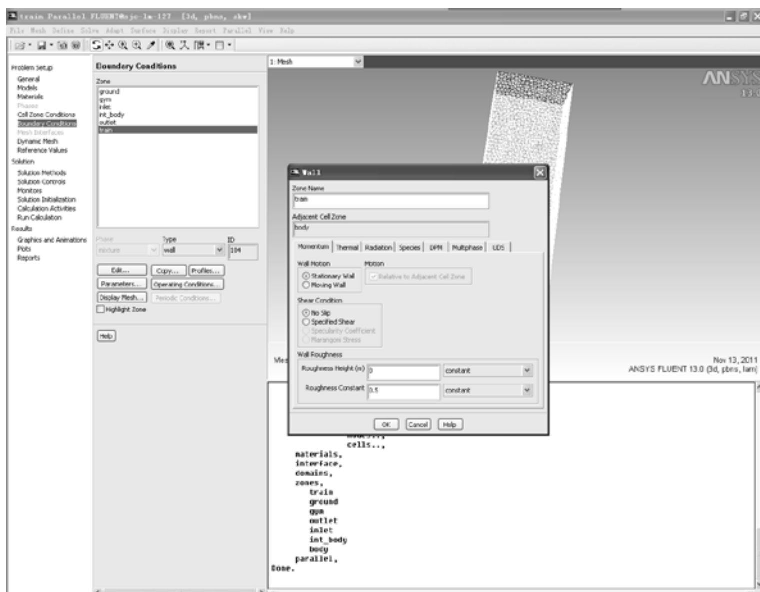


图 4-47　设置列车壁面条件

4．设置列车计算参考数值

单击[Problem Setup]> [Reference Values]项，设置“Compute from”项为“inlet”，设置参考值“Area（m2）”为 11，设置“Reference Zone”项为“body”，如图 4-48 所示。其余设置默认不变。

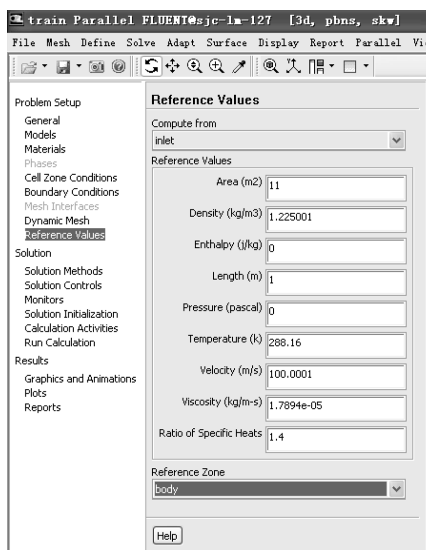


图 4-48 设置列车计算参考数值

4.2.3 求解条件的设置

1）保持[Solution]>[Solution Methods]和[Solution]>[Solution Controls]两项设置不变。

2）单击[Solution]>[Monitors]项，双击“Residuals”项，打开“Residual Monitors”对话框。将“Equations”栏所有项的“Absolute Criteria”（收敛标准）由 0.001 修改为 0.0001，如图 4-49 所示。

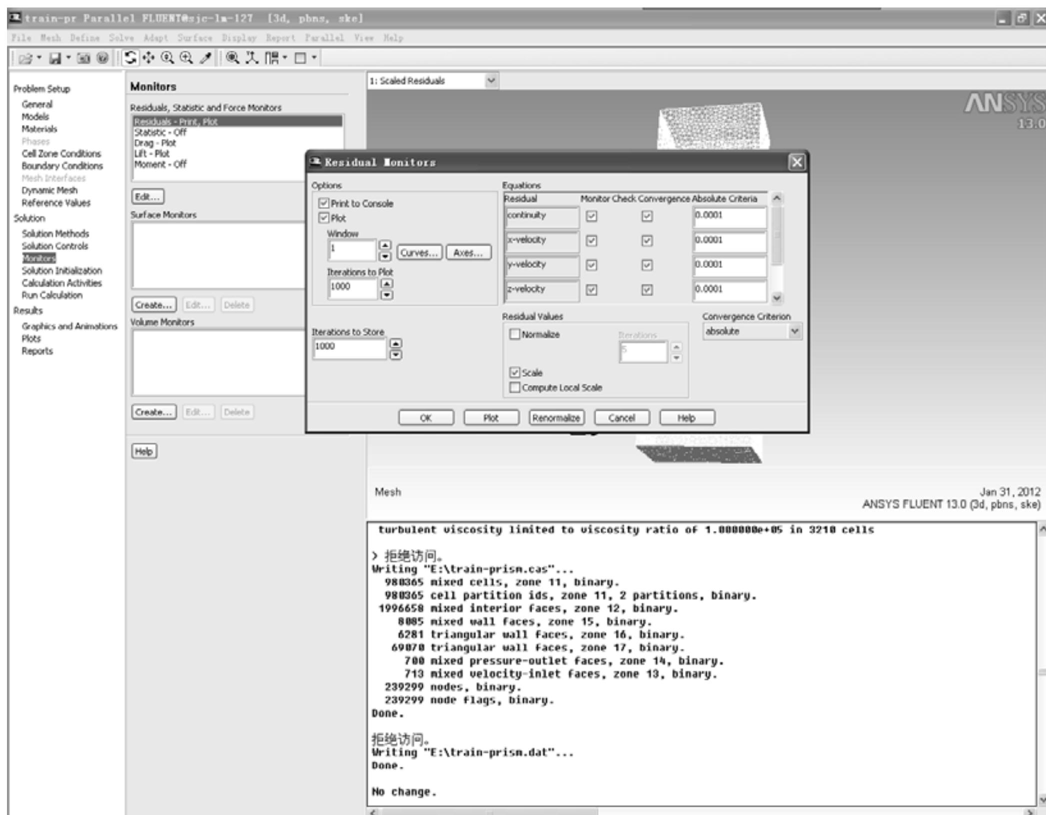


图 4-49 修改收敛标准

3）设置气动阻力监测曲线。单击[Solution]>[Monitors]项，双击“Drag”项，打开“Drag Monitor”对话框。如图 4-50 所示，勾选“Plot”项，Window 编号自动设置为 2（残差曲线窗口编号默认为 1）。选择“Wall Zones”栏中的“train”边界，同时将“Force

Vector”设置为“0，1，0”，即监测列车明线运行所受阻力。单击“OK”按钮返回。

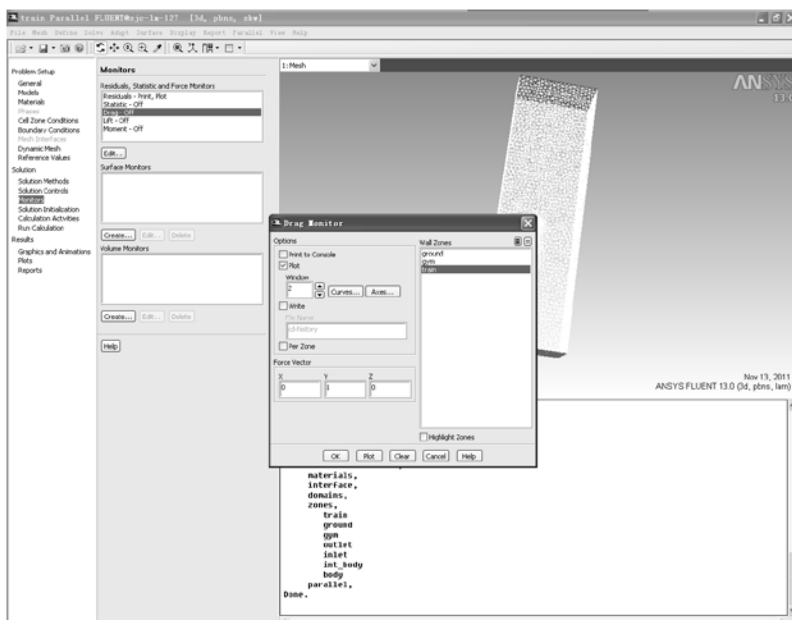


图 4-50　设置气动阻力监测曲线

4）设置气动升力监测曲线。双击“Lift”项，打开“Lift Monitor”对话框。如图 4-51 所示，勾选“Plot”项，Window 编号自动设置为 3。选择“Wall Zones”栏中的“train”边界，同时将“Force Vector”设置为“0，0，1”，即监测列车明线运行所受升力。单击“OK”按钮返回。

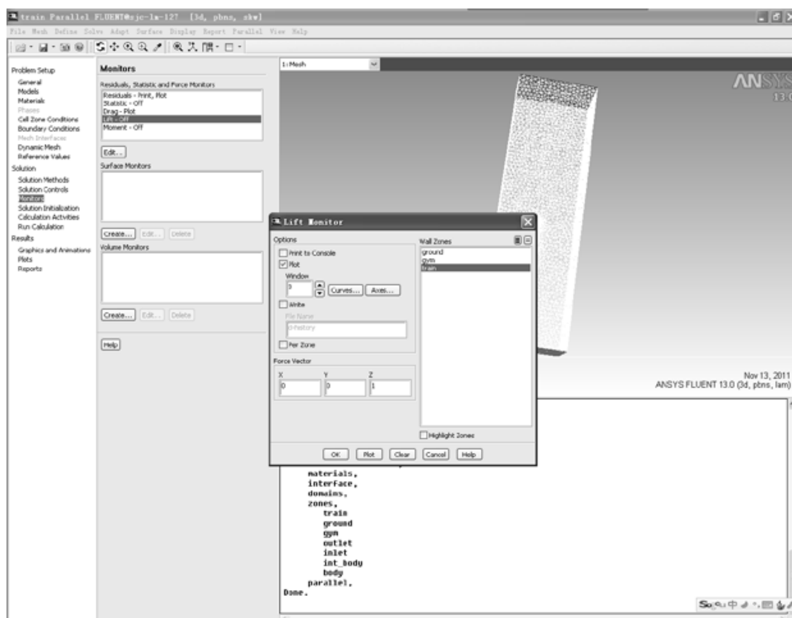


图 4-51　设置气动升力监测曲线

5）单击[Solution]>[Solution Initialization]项，将其属性栏“Compute from”项设置为“inlet”边界，其余设置不变，如图 4-52 所示。单击“Initialize”按钮，进行计算项目的初始化。

6）保持[Solution]>[Calculation Activities]项设置不变。

7）设置迭代步数。单击[Solution]>[Run Calculation]项，将其属性栏中的“Number of Iterations”项设置为 1000，如图 4-53 所示。

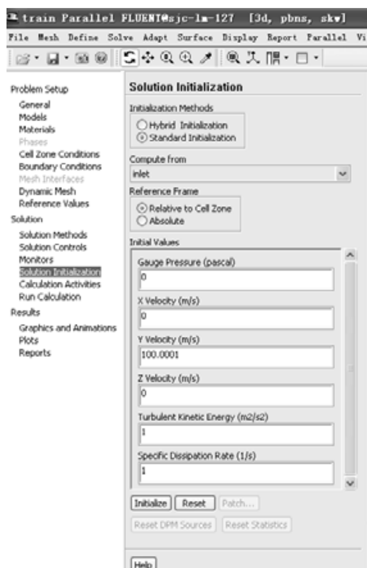


图 4-52 初始化计算项目

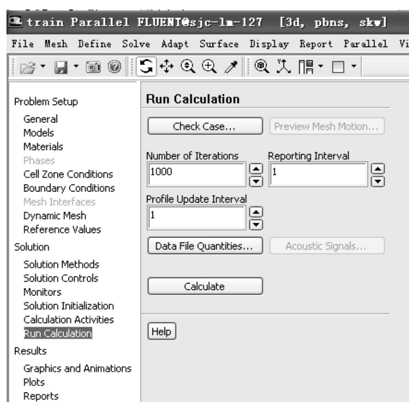


图 4-53 设置迭代步数

8）单击“Calculate”按钮，进行计算。

9）在计算过程中，视图区的残差曲线图和右下侧脚本区随时根据迭代步数进行更新，如图 4-54 所示。用户可以在图 4-54 所示位置对 3 个曲线图进行切换。

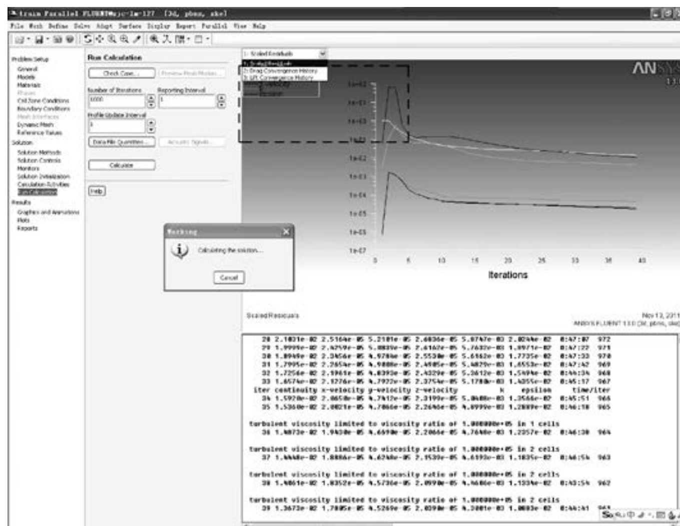


图 4-54 残差曲线图

10）计算完成后，“Information”对话框显示计算完成的信息。单击“OK”按钮确认。注意，计算收敛的判据是各残差曲线趋于稳定，因此，设置收敛标准应视残差曲线的稳定情况而定。

11）计算列车所受气动阻力。单击[Results]>[Reports]项，双击右侧的“Forces”项，出现“Force Reports”对话框。默认选择“Options”栏中的“Forces”项，设置“Direction Vector”为“0，1，0”，并选择“Wall Zones”栏中的“train”边界，如图 4-55 所示。

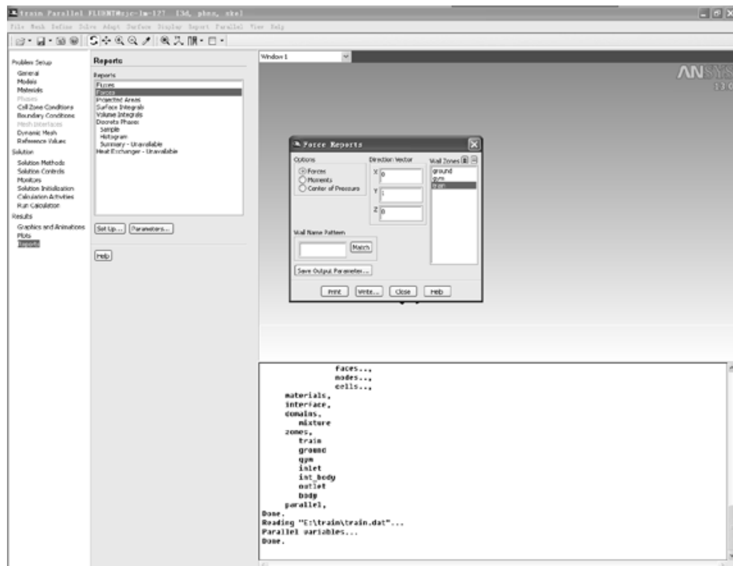


图 4-55　计算列车所受气动阻力

12）单击“Print”按钮，软件右下侧输出各项计算结果，如图 4-56 所示。可以看出，列车所受气动阻力为 34785N，其中压差阻力（Pressure）为 32266N，摩擦阻力（Viscous）为 2519N。

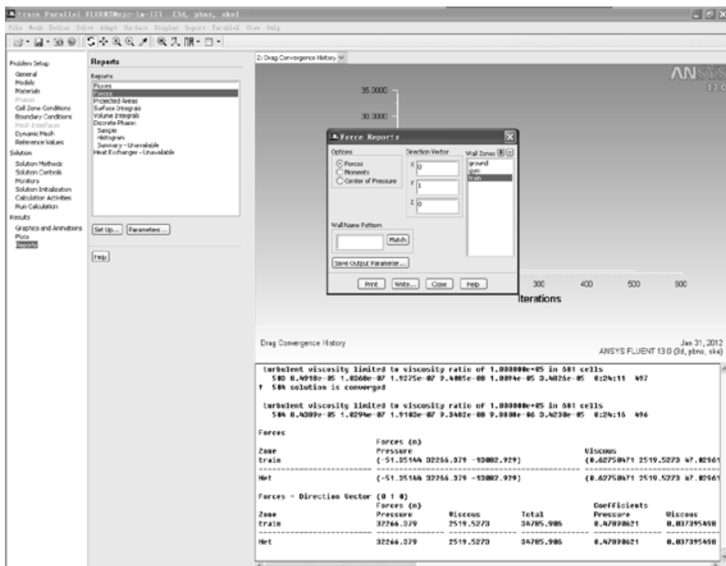


图 4-56　气动阻力结果

13）计算列车所受气动升力。保持其他设置不变，将“Forces”项的“Direction Vector”设置为“0，0，1”，如图 4−57 所示。

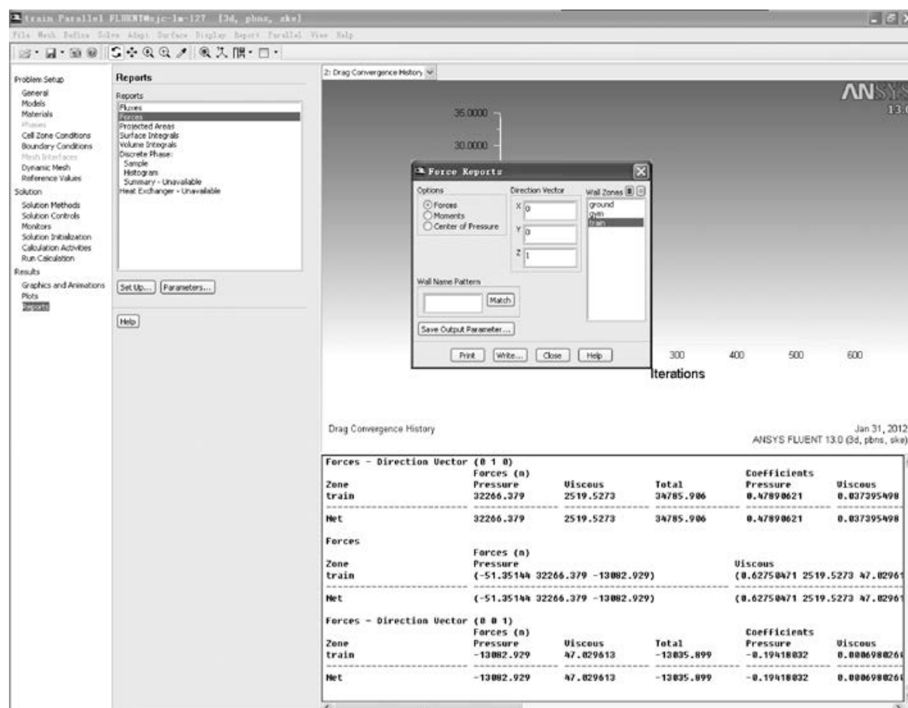


图 4−57　气动升力结果

14）单击“Print”按钮，软件右下侧显示列车所受气动升力为−13035N。

4.2.4 加边界层后计算结果的对比

1）单击工具栏按钮[Mesh]>[Part Mesh Setup]（），弹出“Part Mesh Setup”对话框，如图 4−58 所示。

2）在“Part Mesh Setup”对话框中的“Prism”列中勾选“GROUND”和“TRAIN”两项，并分别设置这两个边界的边界层总厚度（height）为 20mm，增长比（height ratio）为 1.2，总层数（num layers）为 3。单击“Apply”按钮确认操作。

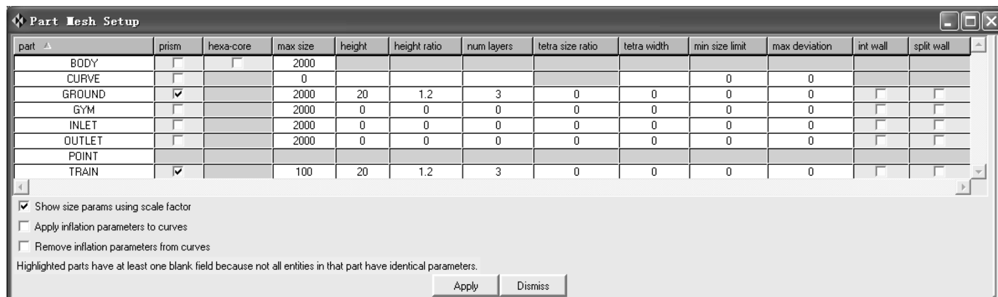


图 4−58　“Part Mesh Setup”对话框

3）进行边界层网格划分。单击工具栏按钮[Mesh]>[Compute Mesh]（），在属性栏中单击工具按钮，如图 4-59 所示。

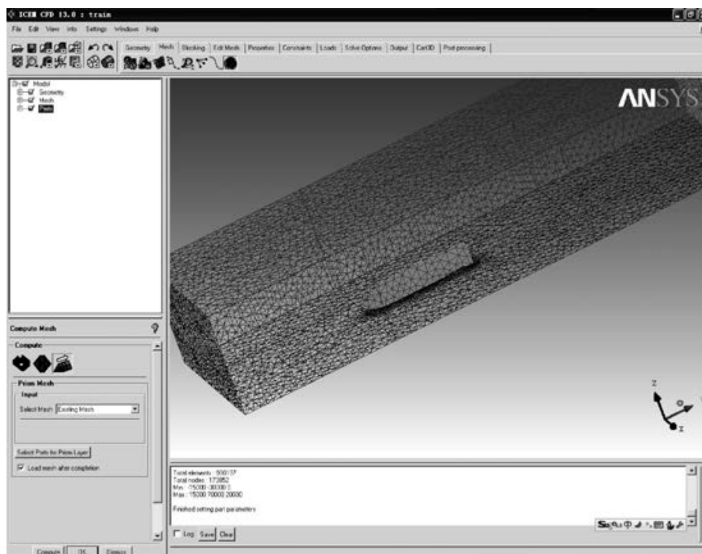


图 4-59　划分边界层网格

4）保持默认设置，单击“Compute”按钮进行网格边界层的划分。

也可以选择工具栏中的[Mesh]>[Compute Mesh]项，在属性栏中选择“Volume Mesh”（）项并勾选“Create Prism Layers”，再单击“Apply”按钮，生成带边界层的体网格。

5）勾选[Model]>[Mesh]>[Volumes]项，显示体网格。

6）设置网格切面。右键单击[Model]>[Mesh]项，选择[Cut Plane]>[Manage Cut Plane]项，如图 4-60 所示。

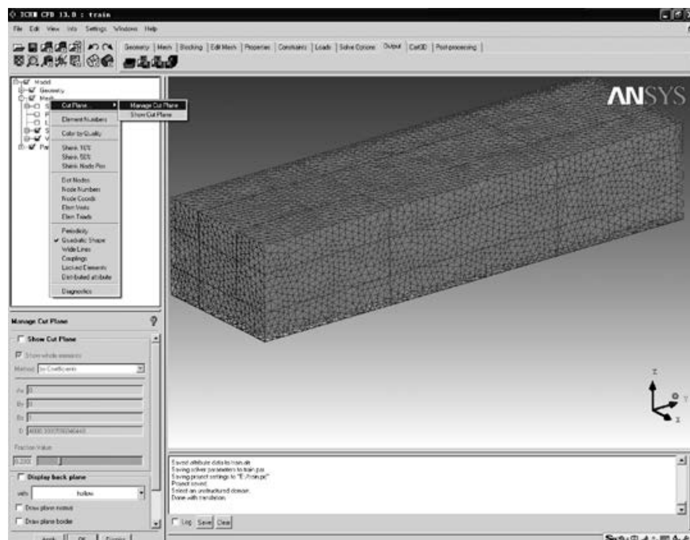


图 4-60　设置网格切面

7）计算域体网格按切面方式显示，如图 4−61 所示。

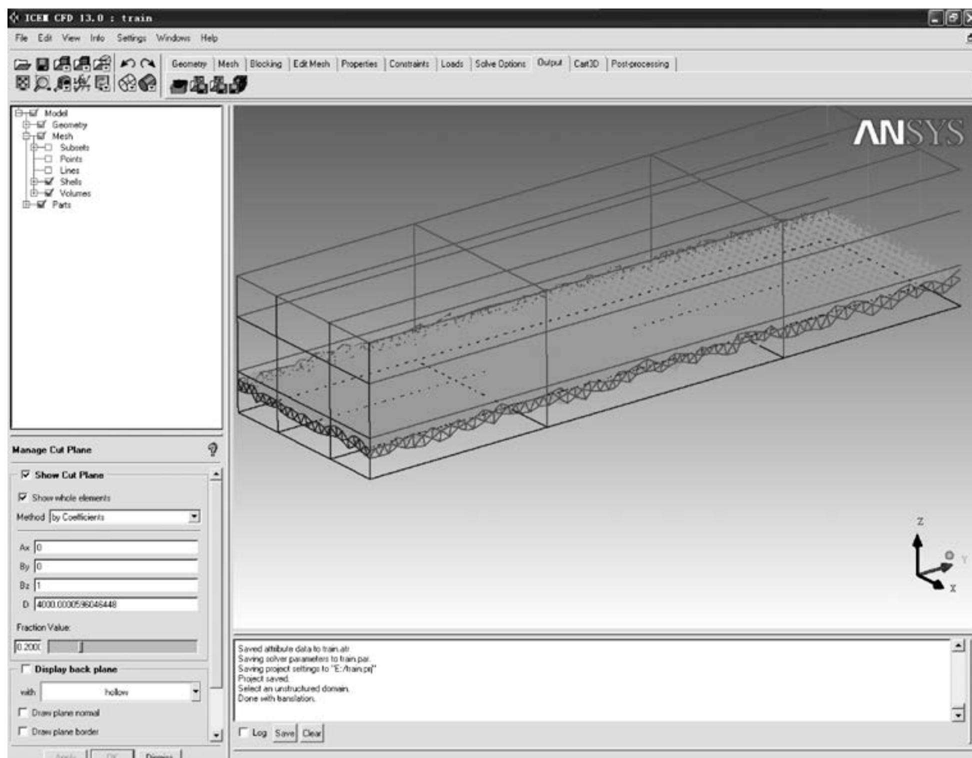


图 4−61　切面上的体网格

8）右键单击[Model]> [Mesh]> [Volumes]项，选择[Cut Plane]>[Solid & Wire]项，如图 4−62 所示。

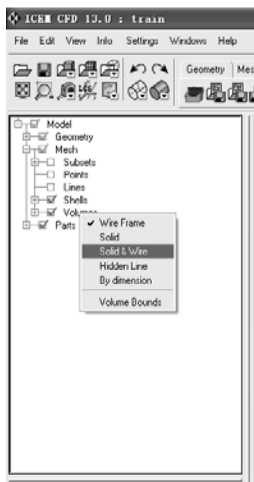


图 4−62　选择 Solid & Wire 方式

9）有边界层的切面体网格（Solid 方式）如图 4−63 所示。

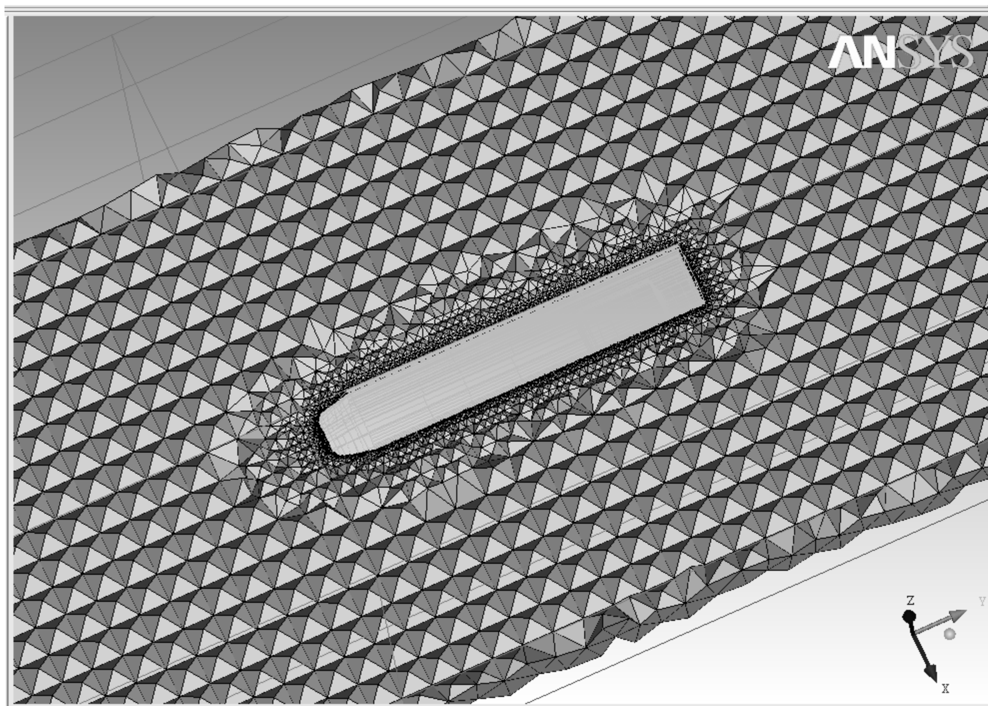


图 4-63　有边界层的切面体网格（Solid 方式）

10）第 4.2.1 节中无边界层的切面体网格（Solid 方式）如图 4-64 所示。

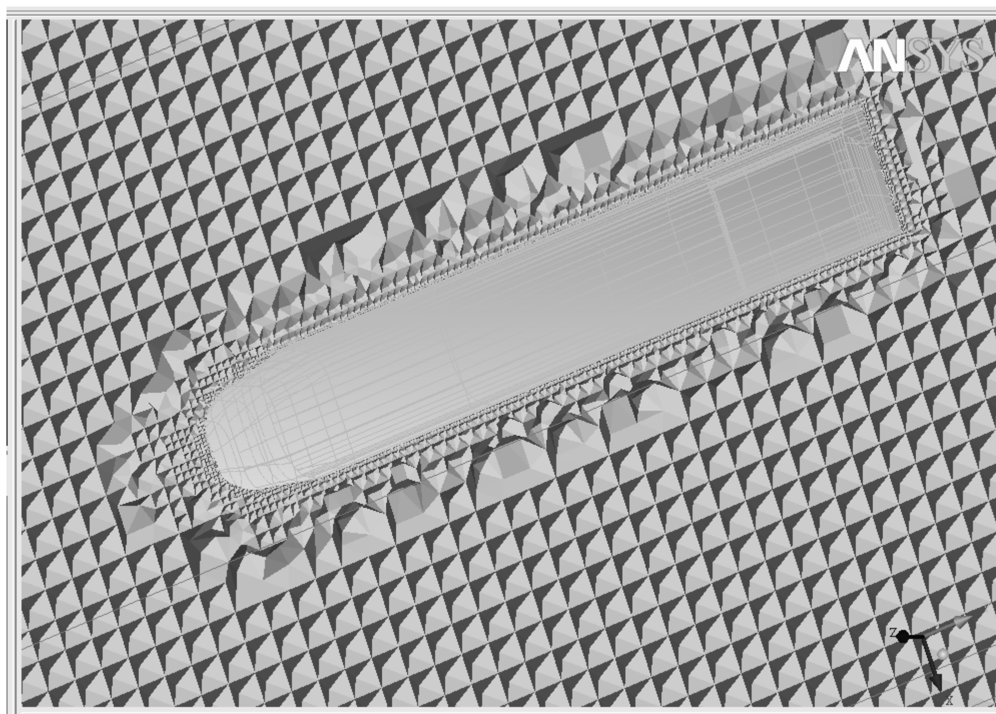


图 4-64　无边界层的切面体网格（Solid 方式）

11）有、无边界层的列车表面网格（Solid & Wire 方式）分别如图 4-65 和图 4-66 所示。

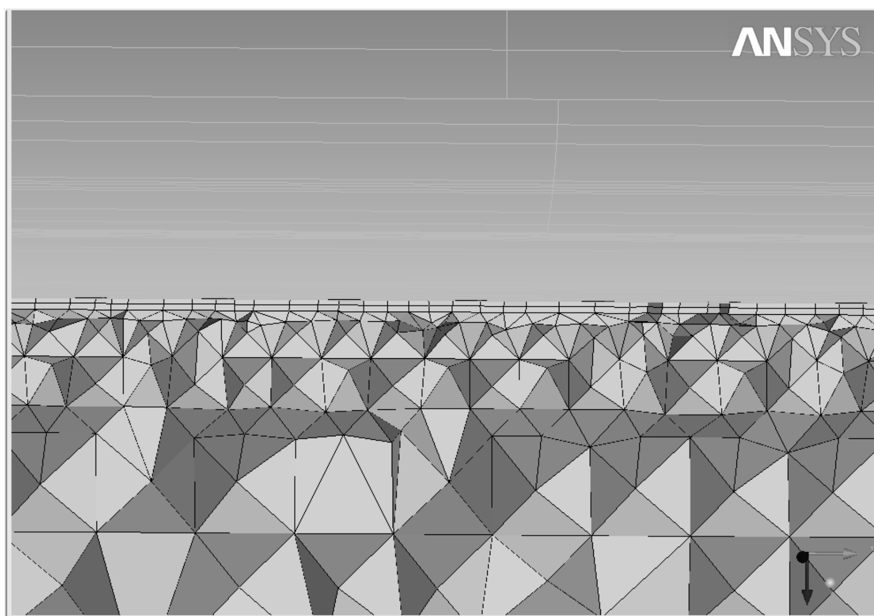


图 4-65 有边界层的列车表面网格（Solid & Wire 方式）

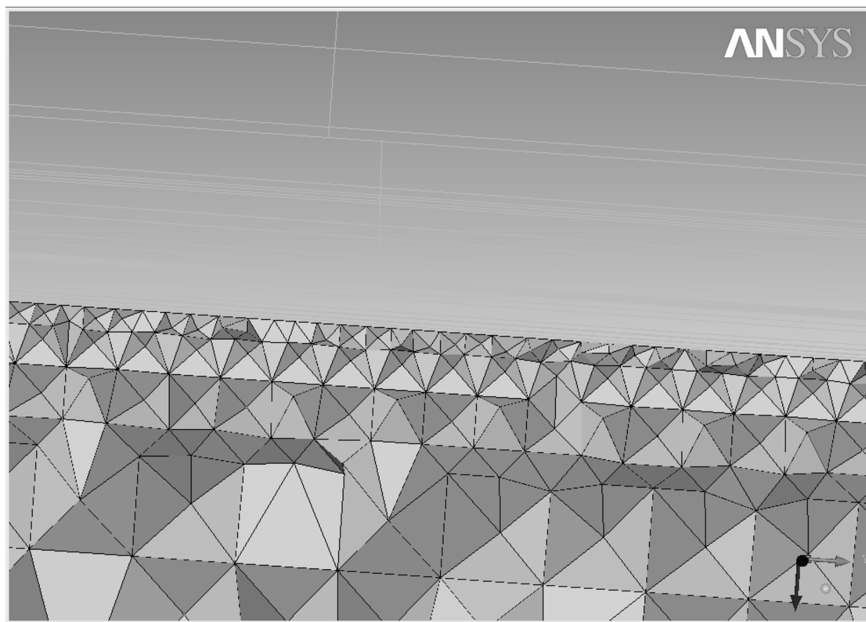


图 4-66 无边界层的列车表面网格（Solid & Wire 方式）

12）输入文件名“train-prism”，保存体网格，如图 4-67 所示。

13）进行网格质量检查。如图 4-68 所示，选择[Edit Mesh]>[Display Mesh Quality]（）项。在属性栏中单击“Apply”按钮，在软件右下角可以看到体网格质量分布。

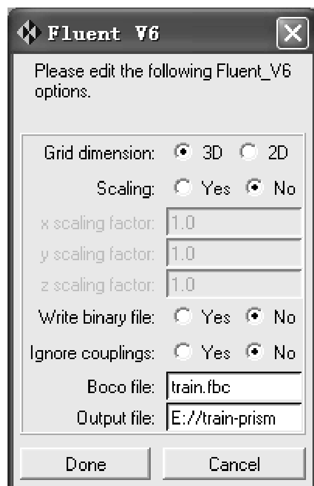


图 4-67 输入文件名

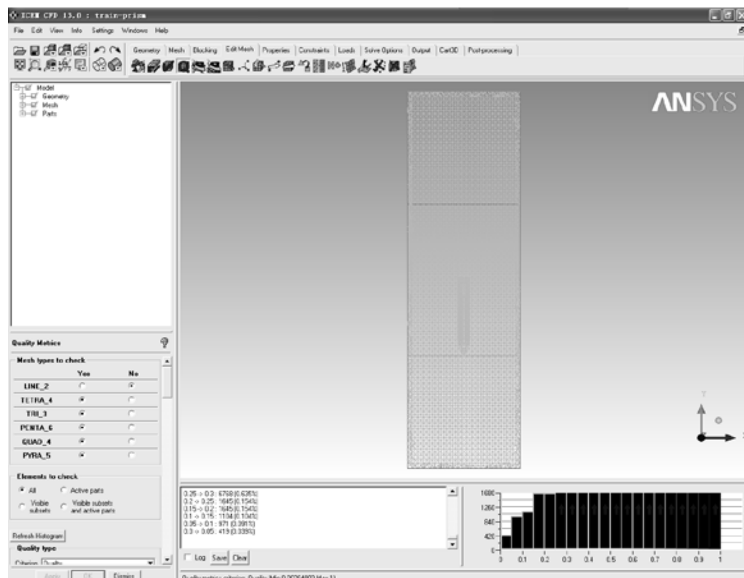


图 4-68 检查网格质量

14）进行网格光顺，以提高网格质量。如图 4-69 所示，选择[Edit Mesh]>[Smooth Mesh Globally]（）项。在属性栏中单击“Apply”按钮，在软件右下角可以看到体网格质量分布。（注意：由于模型质量的原因，网格质量不是很好，读者可以用更好的模型进行计算）

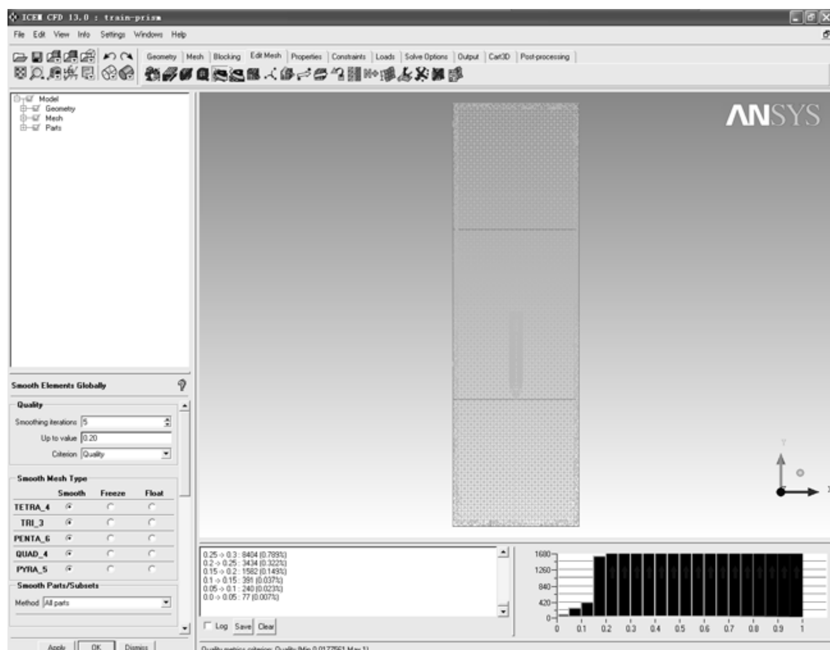


图 4-69 网格光顺

15）按照前两节的条件设置进行计算。

计算完成后，气动阻力和气动升力的计算结果分别为 35380N 和-12096N。其中，压差

阻力（Pressure）为 32198N，摩擦阻力（Viscous）为 3182N。对比发现，相对于表面划分边界层前，列车气动阻力在表面划分边界层后有所增加，这是由于软件更好地捕捉到了列车表面的摩擦力。由于本文研究的对象仅为头车模型，所以计算结果不具代表性，此处不再详细分析。

4.2.5 计算结果后处理

1）选择[File]>[Load Results...]菜单命令，导入计算结果，如图 4-70 所示。

2）选择文件名“train-prism.cas”，单击“Open”按钮，如图 4-71 所示。

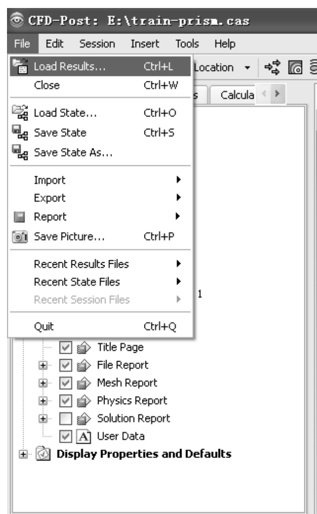


图 4-70 导入计算结果

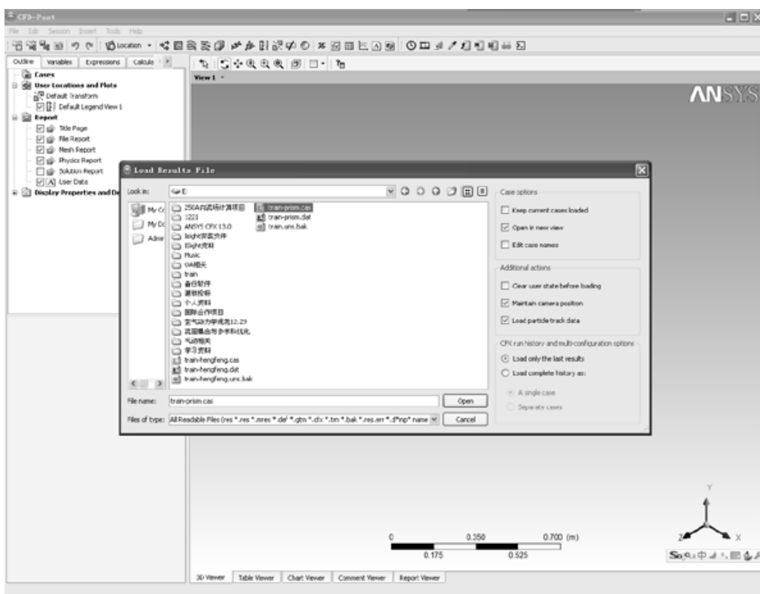


图 4-71 选择文件名

3）在弹出的“Global Variable Ranges”对话框中单击“OK”按钮确认操作，如图 4-72 所示。

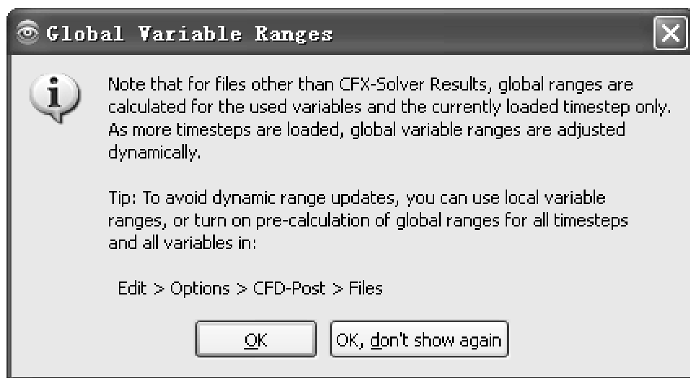


图 4-72 “Global Variable Ranges”对话框

4）创建列车表面压力云图。单击工具栏中的按钮，输入文件名“Trainsurface”，如

图 4-73 所示。

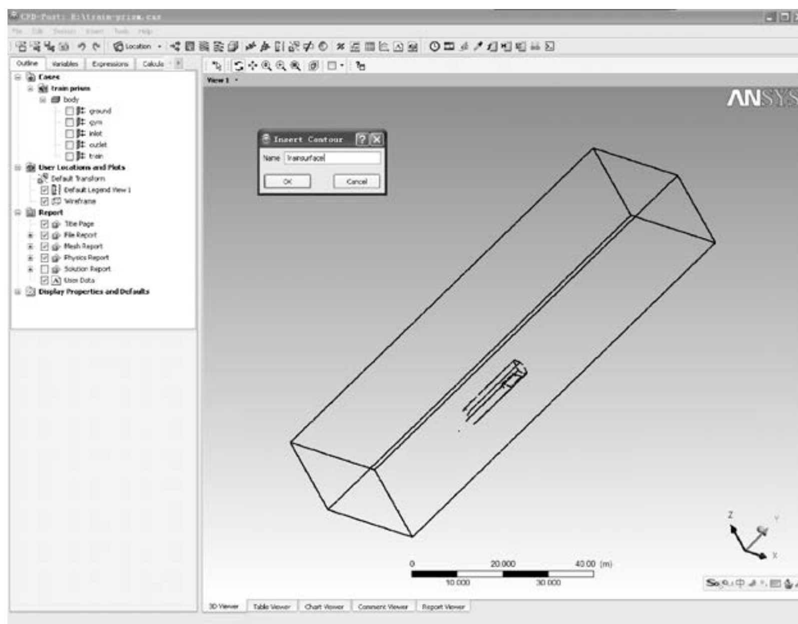


图 4-73 创建列车表面压力云图

5）设置列车表面压力云图属性。如图 4-74 所示，将“Locations”项设置为“train”边界，将“Range”项设置为“Local”，将“# of Contours”项设置为 100，单击“Apply”按钮。

可以看出，列车表面压力在头部鼻端点最高，然后沿变截面区域不断降低，车尾后端面处压力最低。

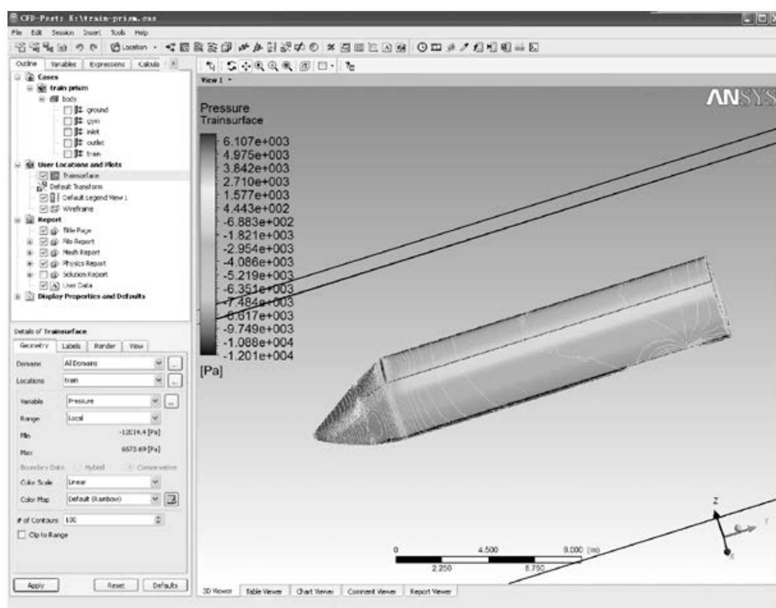


图 4-74 设置列车表面压力云图属性

6）创建截面速度矢量图。选择[Location]>[Plane]项，创建截面，如图 4-75 所示。

7）输入文件名“MidPlane”，如图 4-76 所示。

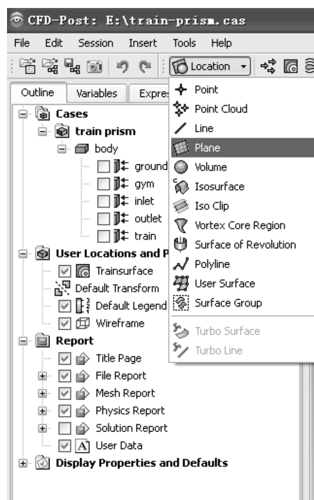


图 4-75 创建截面速度矢量图



图 4-76 输入文件名

8）在“MidPlane”截面属性栏中选择“Method”项为“YZ Plane”，单击“Apply”按钮，视图区中创建好的截面如图 4-77 所示。

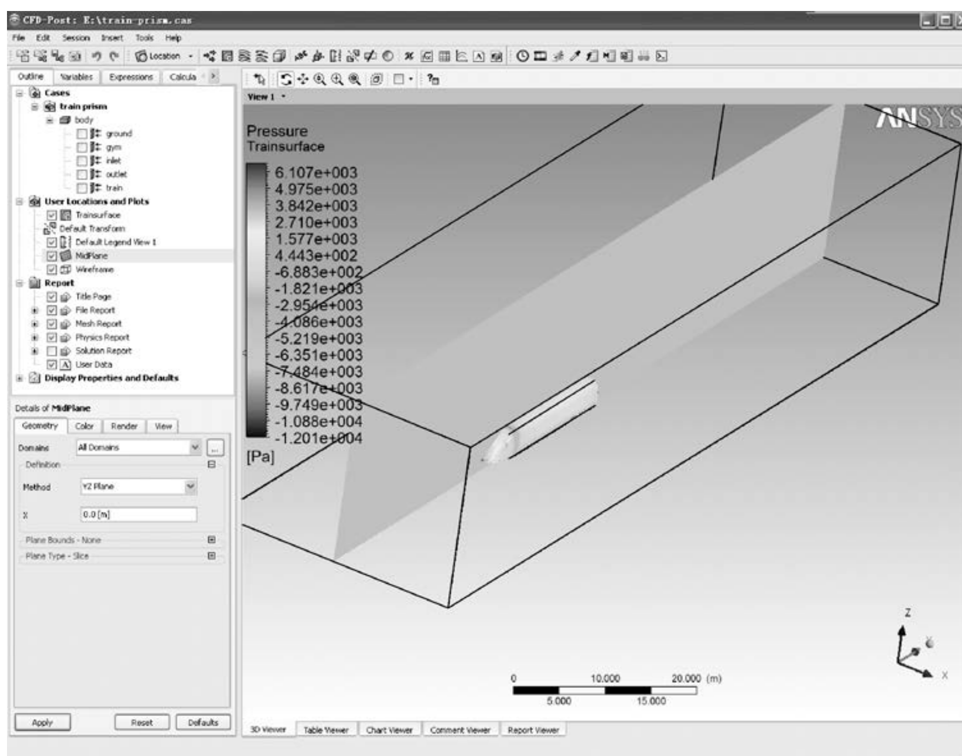


图 4-77 视图区中创建好的截面

9）单击工具栏中的按钮，输入文件名“Vector 1”，在其属性栏中设置“Locations”为“MidPlane”，同时取消选择“Outline”Tab 页下的“MidPlane”项，单击“Apply”按钮，视图区中创建好的速度矢量图如图 4−78 所示。

可以看出，气流在车头变截面区域附近方向有所变化，同时由于车尾后壁为一竖直壁面，所以车尾区域存在较大范围的回流区域。

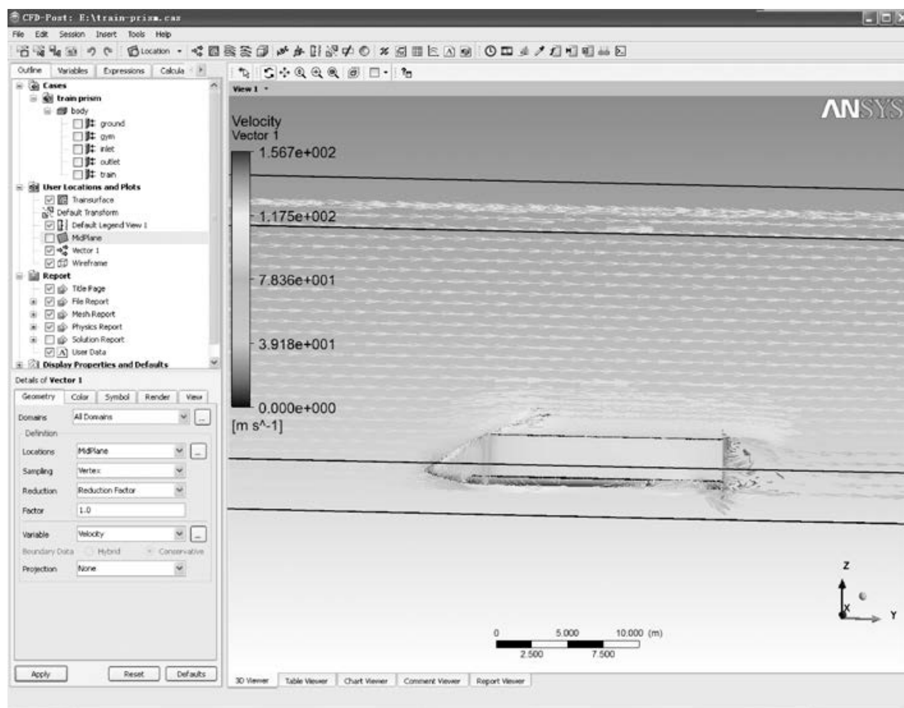


图 4−78　视图区中创建好的速度矢量图

10）选择[File]>[Save State]菜单命令，输入文件名“train prism.cst”，保存后处理文件，如图 4−79 所示。



图 4−79　保存后处理文件

4.3 横风运行气动性能计算

4.3.1 计算模型的设置

1．边界分割

回到 ICEM-CFD 软件下，进行计算域边界的分割，以方便进行横风运行气动性能计算的边界条件设置。注意，实际横风运行工况的计算域应比明线运行工况的计算域大，由于本文仅限于软件示范，故继续采用原来的计算域。

1）取消选择除[Model]>[Parts]>[GYM]项之外的其余项，同时右键单击[Model]>[Parts]，选择“Create Part”命令，在属性栏中输入 Part 名为“TOP”并单击“Entities”项右侧的按钮，视图区中的鼠标显示为十字形式。首先单击鼠标左键，然后单击鼠标中键选中计算域顶面，如图 4-80 所示。

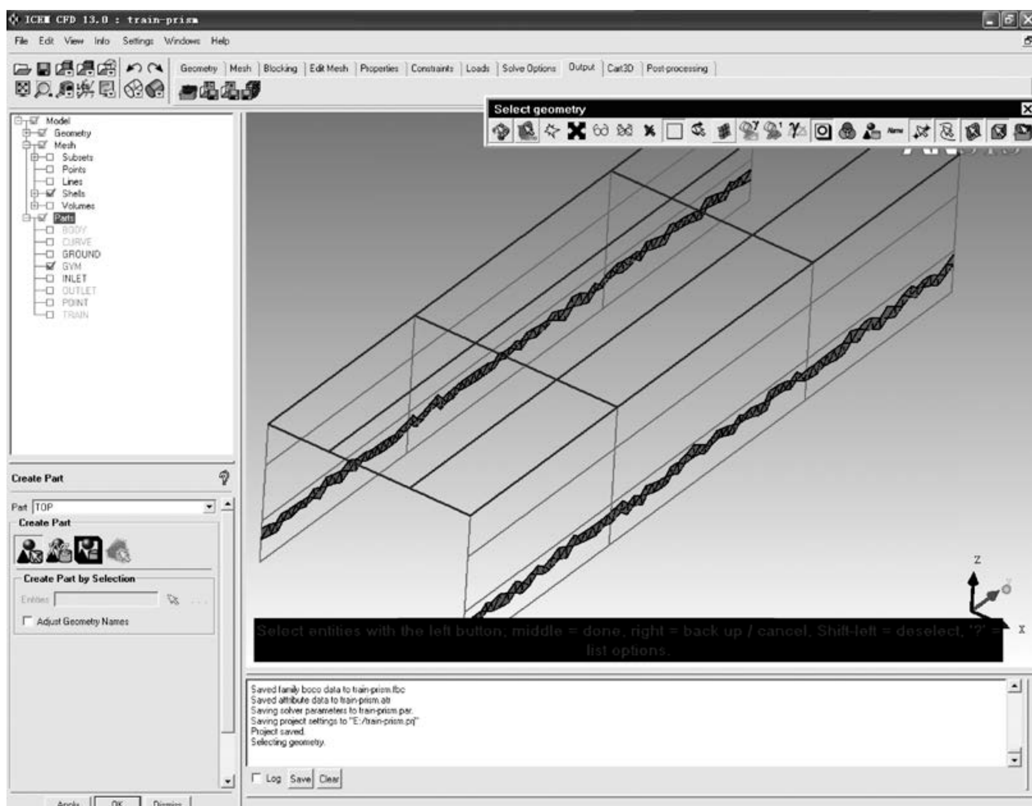


图 4-80 选中计算域顶面

2）在属性栏中输入 Part 名为“SIDE-IN”，首先单击鼠标左键，然后单击鼠标中键选中计算域侧面（面向读者）。在属性栏中输入 Part 名为“SIDE-OUT”，首先单击鼠标左键，然后单击鼠标中键选中计算域另一侧面。[Model]>[Parts]下出现 3 个新的 Part 项，如图 4-81 所示。

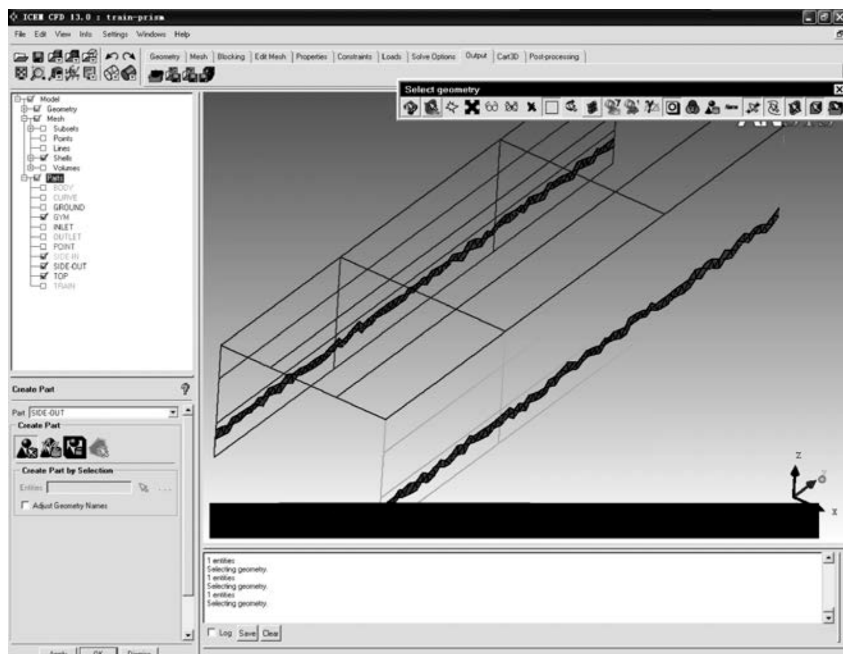


图 4-81　3 个新的 Part 项

3）进行网格划分。如图 4-82 所示，单击工具栏按钮[Mesh]>[Compute Mesh]（）项，在属性栏中采用默认的“Tetra/Mixed”网格划分方式，然后单击“Compute”按钮开始划分网格。

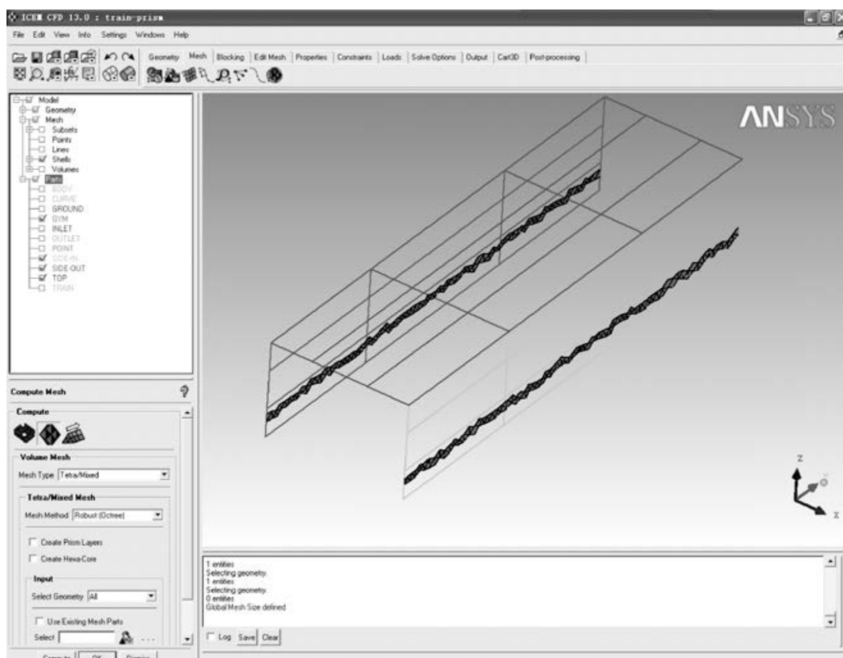


图 4-82　进行网格划分

4）在弹出的“Mesh Exists”对话框中单击“Replace”按钮，用新划分网格替换已有网格，如图 4-83 所示。

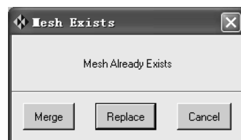


图 4-83　替换已有网格

5）单击工具栏按钮[Mesh]>[Compute Mesh]（）项，在属性栏中单击工具按钮，进行边界层网格划分。

6）选择菜单项[File]>[Save Project As]，输入文件名“train-hengfeng.prj”，单击“保存”按钮，保存该项目，如图 4-84 所示。

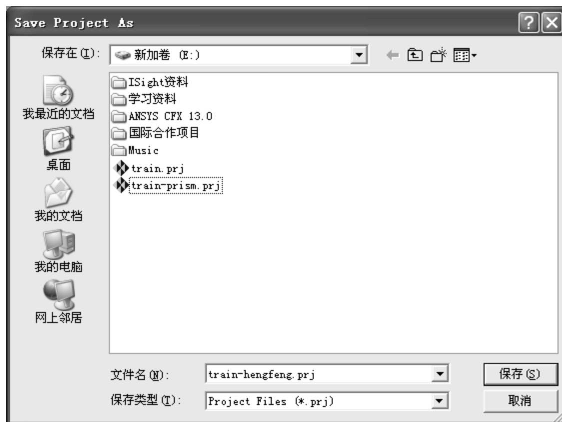
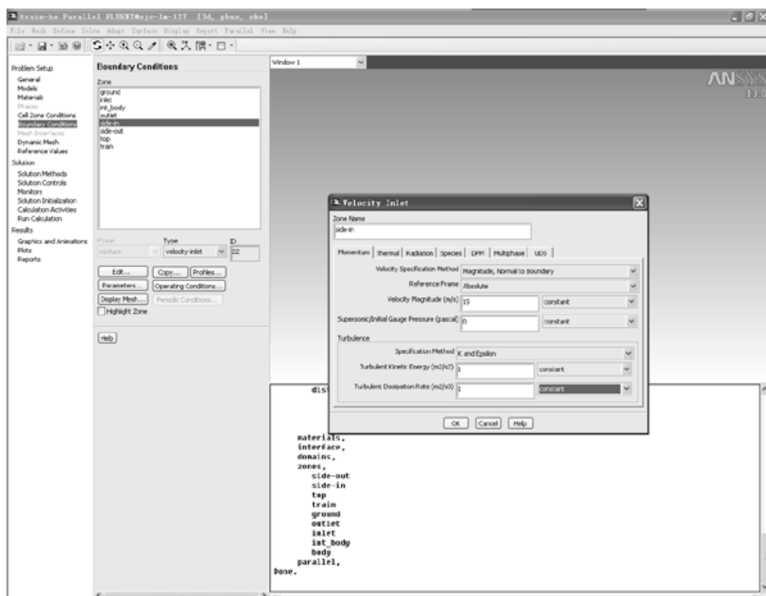


图 4-84　保存该项目

7）输入文件名“train-hengfeng.msh”，保存网格文件。

2．计算条件的设置

1）设置横风入口边界条件。选择“side-in”边界，将其设置为“velocity-inlet”条件。双击“side-in”边界，在“Velocity Inlet”对话框中输入速度为 15m/s，如图 4-85 所示。


图 4-85　设置横风入口边界条件

2）选择“side-out”边界，将其设置为“Pressure Outlet”条件，保持默认设置，然后单击“OK”按钮返回。

3）其余边界参照前两节的条件进行设置。

4.3.2 计算结果后处理

1）保持求解设置不变，开始计算。

2）计算完成后，双击[Results]>[Reports]项属性栏中的“Forces”，在“Force Reports”对话框中分析得出，气动阻力和气动升力的计算结果分别为 143522N 和−35320N，其中压差阻力（Pressure）为 136 377N，摩擦阻力（Viscous）为 7145N。对比发现，列车气动阻力、升力均较无横风运行工况增加很多。

下面进行列车倾覆力矩（又称侧滚力矩）的分析。

3）将“Force Reports”对话框的“Options”项设置为“Moments”，在“Moment Center”项中输入向量“−0.745，−1.3265，0.0178”，在“Moment Axis”项中输入向量“0，1，0”，如图 4−86 所示。

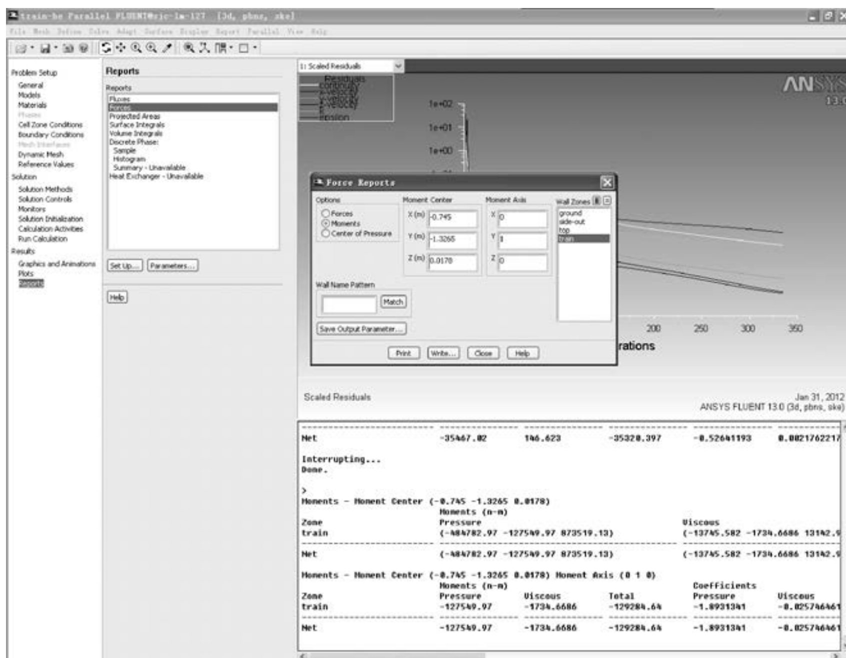


图 4−86　倾覆力矩分析

4）选择[File]>[Load Results...]菜单命令，导入计算结果“train-hengfeng.cas”。

5）创建列车表面压力云图。单击工具栏上的按钮，输入文件名“Trainsurface”。将压力云图属性栏中的“Locations”项设置为“train”边界，将“Range”项设置为“Local”，将“# of Contours”项设置为 100，单击“Apply”按钮，视图区中列车表面压力云图如图 4−87 所示。

可以看出，受横风影响，列车头部表面压力较高区域向鼻端右侧偏移。

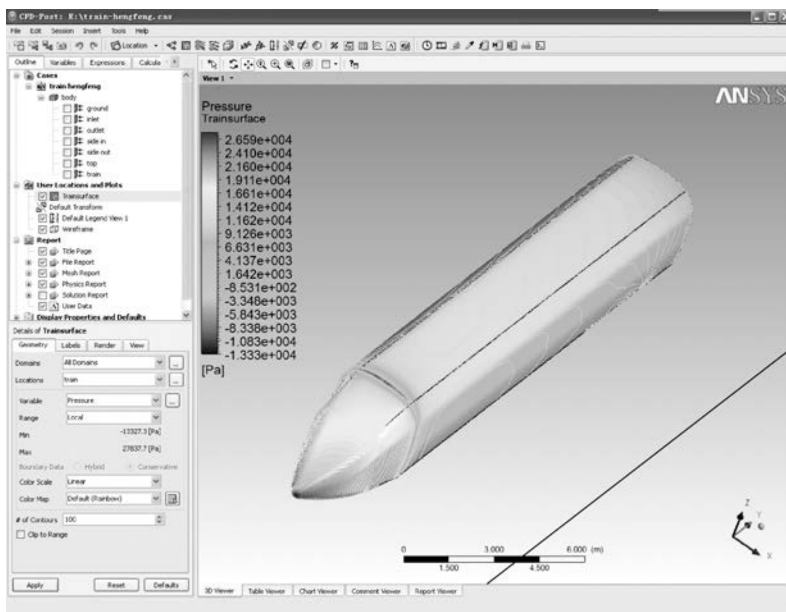


图 4-87　视图区中列车表面压力云图

6）创建截面速度矢量图。选择[Location]>[Plane]项，创建截面“MidPlane”。

7）在“MidPlane”截面属性栏中选择“Method”项为“ZX Plane”，将“Y”值设置为 5m，单击“Apply”按钮，视图区中创建好的截面如图 4-88 所示。

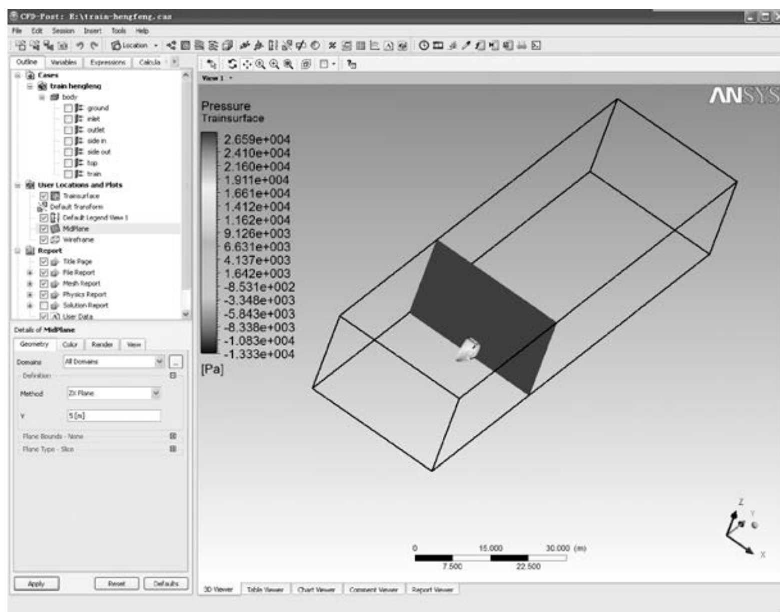


图 4-88　视图区中创建好的截面

8）单击工具栏上的按钮，输入文件名“Vector 1”，在其属性栏中将“Locations”项设置为“MidPlane”，将“Projection”项设置为“Tangential”，同时取消选择“Outline”Tab 页下



的“MidPlane”项，单击“Apply”按钮，视图区中创建好的速度矢量图如图 4−89 所示。

可以看出，横风方向的气流在越过车身区域后，在背风侧形成较大范围的回流区域。

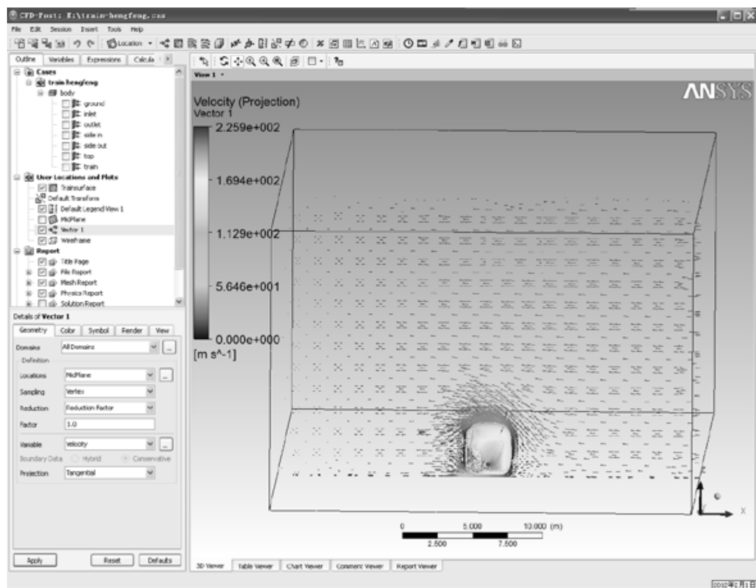


图 4−89　视图区中创建好的速度矢量图

9）选择[File]>[Save State]菜单命令，输入文件名“train hengfeng.cst”，保存后处理文件，如图 4−90 所示。



图 4−90　保存后处理文件

4.4　高速列车明线交会性能研究

4.4.1　生成计算网格

1）打开模型文件。选择[File]>[Import Geometry]>[STEP/IGES]项，在弹出的“Select STEP/IGES files”对话框中导入列车交会模型文件“jiaohuimoxing.IGS”。

2）在“Import Geometry From Step or IGES”对话框中默认选择其他导入选项。单击“Apply”按钮，导入后的列车模型如图 4−91 所示。

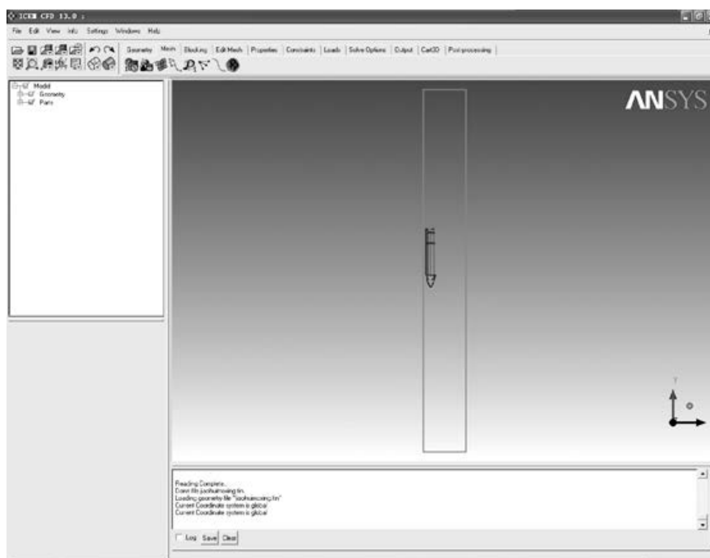


图 4−91 导入后的列车模型

3）显示模型的所有面。选择[Model]>[Geometry]下的“Surfaces”项，其余项不选。

4）建立各部分边界。右键单击 [Model]>[Parts]项，选择“Create Part”项，如图 4−92 所示。

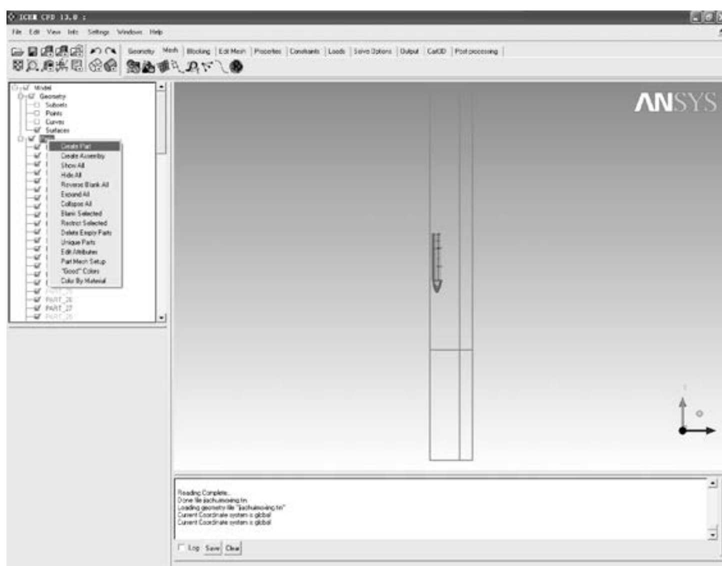


图 4−92 建立各部分边界

5）在属性栏中输入“Part”名为 TRAIN，框选车体表面，如图 4−93 所示。单击鼠标中键确认操作。

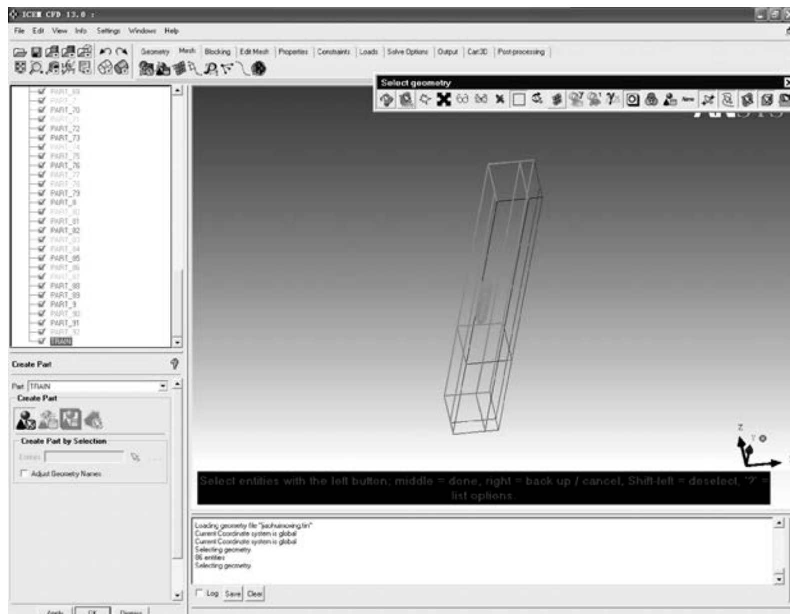


图 4-93　输入“Part”名

6）在属性栏中依次输入“Part”名：IN、OUT、GROUND、INTERFACE、SYM，分别选择图 4-94 中计算域的 6 个面，单击鼠标中键确认操作。其中，IN、OUT 分别为长方体计算域的两个端面，INTERFACE 为左侧面，GROUND 为底面，SYM 为顶面和右侧面。

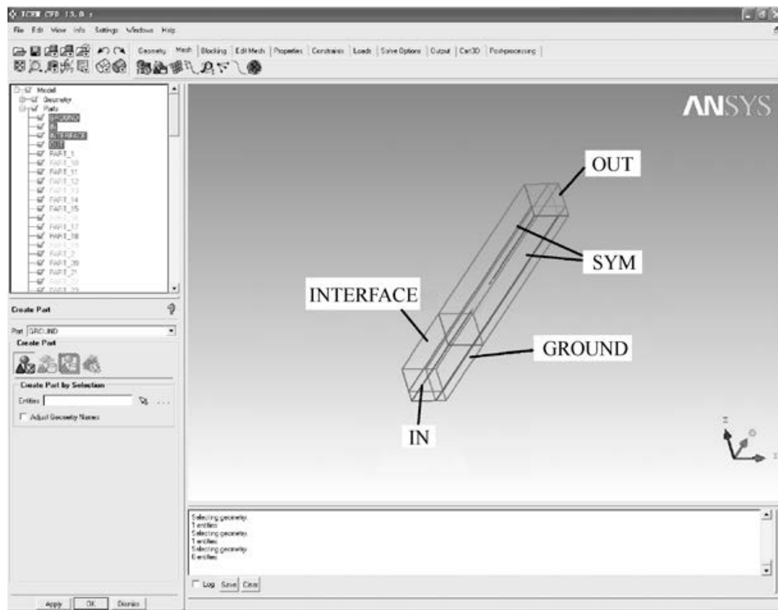


图 4-94　各边界对应的计算域表面

7）单击工具栏按钮[Geometry]>[Create Body]（），输入“Part”名为 FLUID，选择图 4-95 中的点 1（长方体顶点）和点 2（列车车体上的一点），单击鼠标中键确认操作。

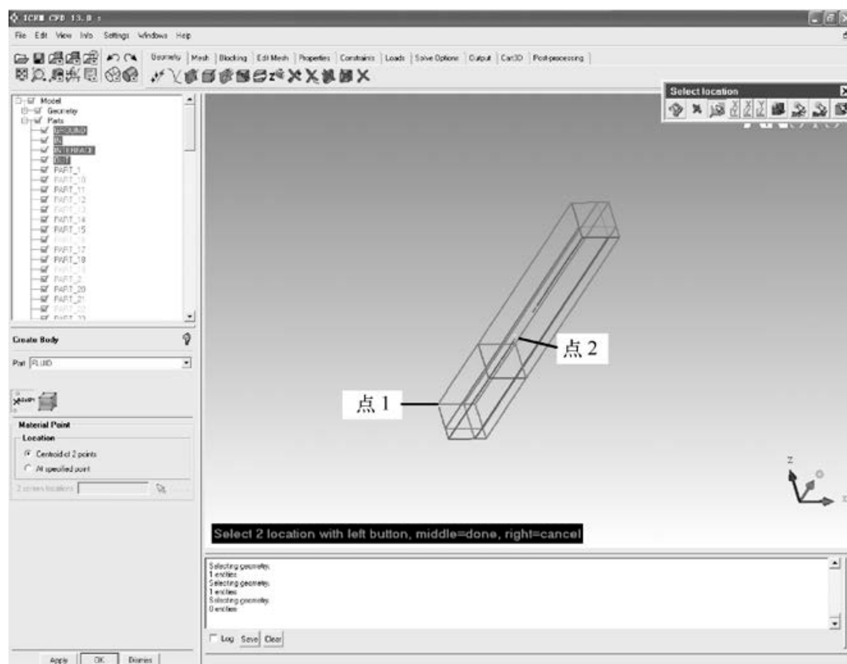


图 4-95　选择对角点

8）进行全局网格设置。单击工具栏按钮[Mesh]>[Global Mesh Setup]（），在“Global Element Seed Size”栏中输入“Max element”值为 2000.0，如图 4-96 所示。单击“Apply”按钮确认操作。

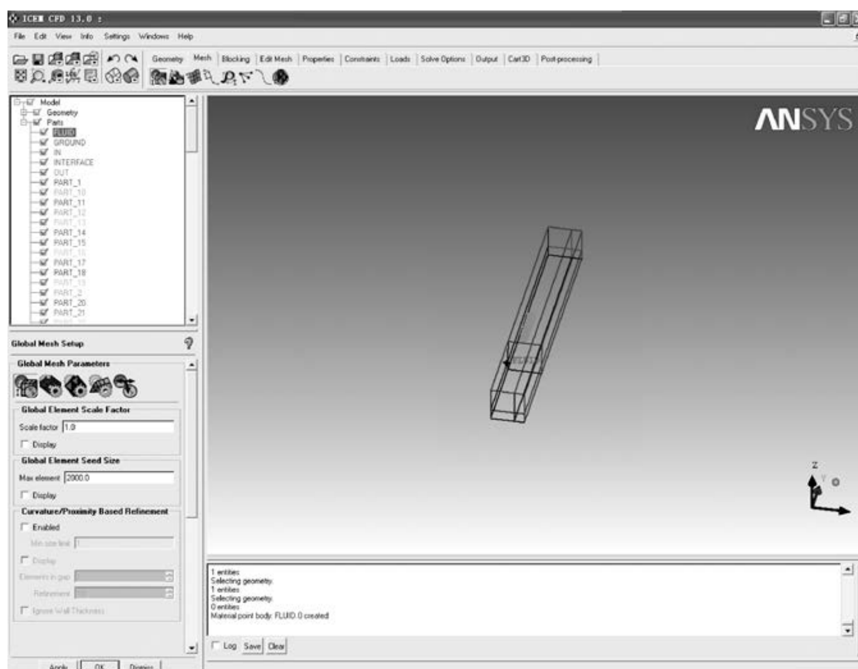


图 4-96　设置全局网格

9）单击工具栏按钮[Mesh]>[Part Mesh Setup]（ ），弹出“Part Mesh Setup”对话框，按如图 4-97 所示进行网格设置。

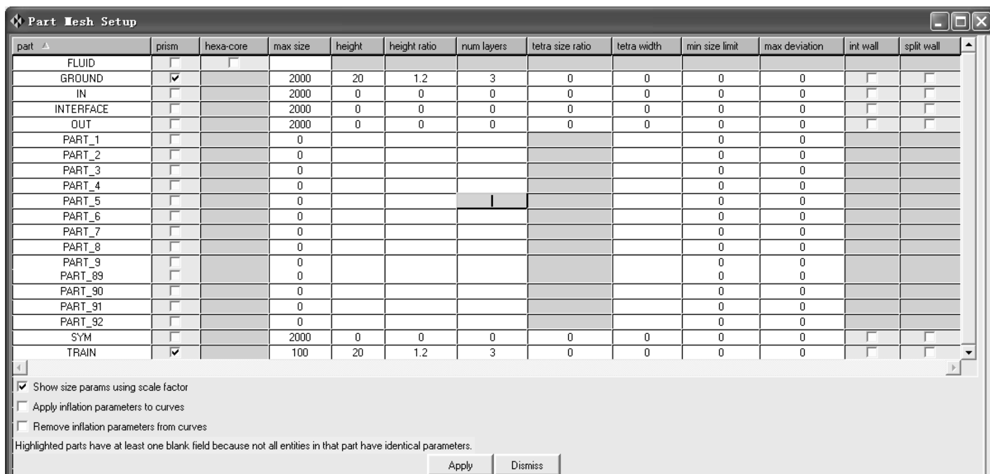


图 4-97 “Part Mesh Setup”对话框

10）进行网格划分。选择工具栏按钮[Mesh]>[Compute Mesh]（ ），在属性栏中选择“Volume Mesh”（ ）项并勾选“Create Prism Layers”，采用默认的“Tetra/Mixed”网格划分方式，再单击“Apply”按钮，生成带边界层的体网格。

11）设置压力监测点。右键单击[Model]>[Parts]项，选择“Create Part”项，同时取消选择[Model]>[Geometry]项，仅选择显示[Model] >[Parts] >[TRAIN]项。依次输入文件名：PRESSURE1、PRESSURE2，在车头和车体区域选择两个网格，如图 4-98 所示。

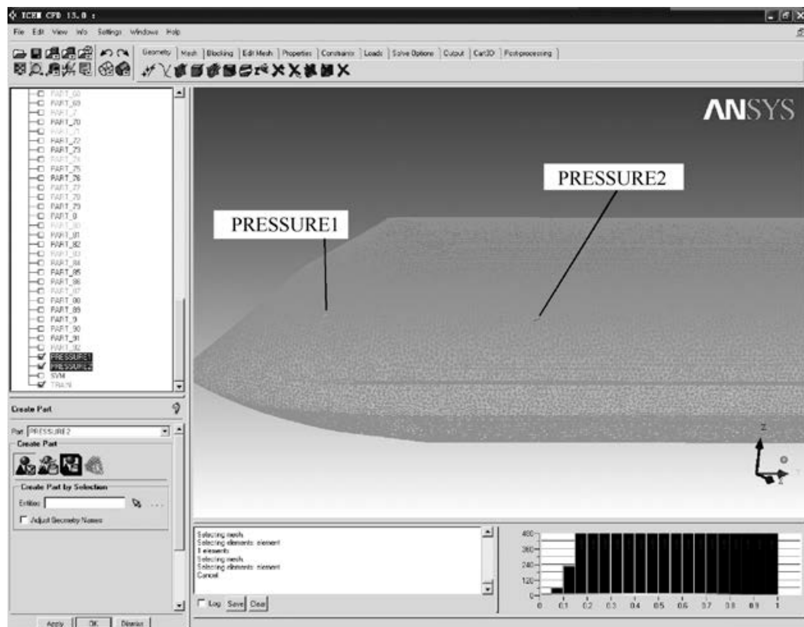


图 4-98 设置压力监测点

12）按照相同的方法在列车另一端创建 PRESSURE3（PRESSURE1 另一侧）和 PRESSURE4（PRESSURE2 另一侧），如图 4-99 所示。

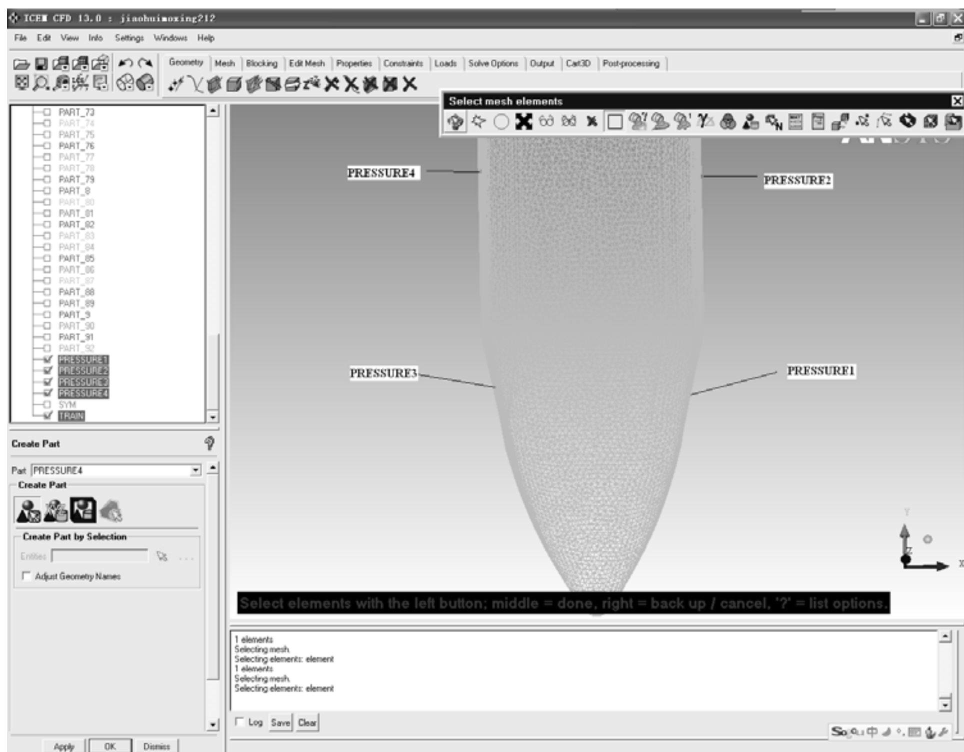


图 4-99 4 个监测点的位置示意图

13）选择网格输出格式。单击工具栏按钮[Output]>[Solver Setup]（），在属性栏中选择“Output Solver”项为“Fluent_V6”，选择“Common Structural Solver”项为“ANSYS”。

14）在“Fluent V6”对话框中勾选 Scaling 选项，将 *X*、*Y*、*Z* 3 个方向的缩放因子都设置为 0.001，如图 4-100 所示。将网格文件输出为“jiaohui.msh”，单击“Done”按钮确认保存。

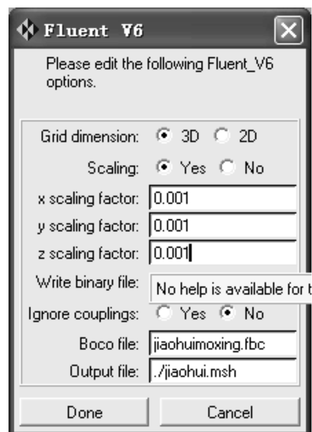


图 4-100 输入文件名

4.4.2 计算模型的设置

本章采用滑移网格技术，计算列车明线交会工况。

1．导入网格

1）单击[开始]菜单，打开 FLUENT 软件启动界面，选择“并行计算->4 核”方式。

2）导入网格文件。选择[File]>[Read]>[Mesh...]菜单命令，导入网格文件“jiaohui.msh”。

3）显示网格。选择菜单项[Display]> [Mesh...]，打开“Mesh Display”对话框。如图 4-101 所示，单击“Mesh Display”对话框中的“Display”按钮，视图区出现计算模型的网格。单

击“Close”按钮退出。

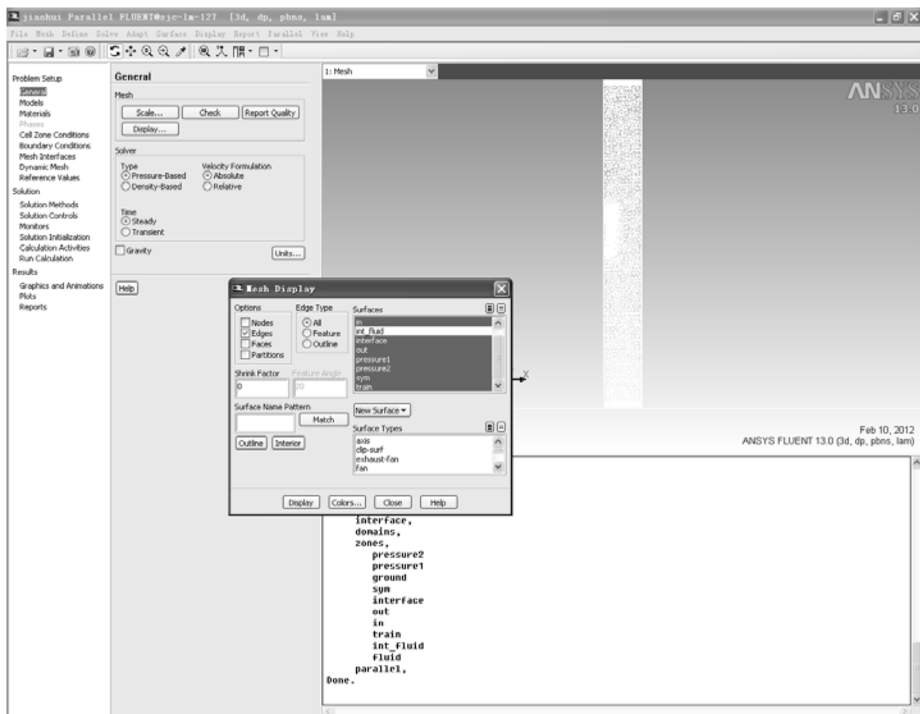


图 4-101　显示网格

4）选择[Mesh] > [Rotate...]菜单命令，在弹出的“Rotate Mesh”对话框中设置“Rotation Angle(deg)”项为 180，同时将“Rotation Origin”设置为如图 4-102 所示的数值。单击“Rotate”按钮旋转网格。

5）选择[Mesh] > [Translate...]菜单命令，在弹出的“Translate Mesh”对话框中设置“Translation Offsets”栏中的“Y”项为 100，单击“Translate”按钮平移网格，如图 4-103 所示。

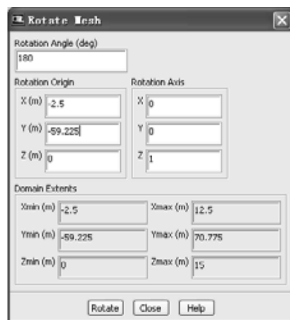


图 4-102　旋转网格

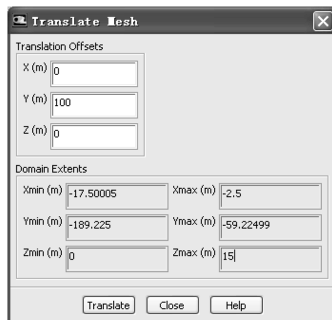


图 4-103　平移网格

6）再次导入网格文件“jiaohui.msh”。如图 4-104 所示，选择菜单项[Mesh] > [Zone]> [Append Case File...]，打开选择网格文件“jiaohui.msh”。

7）通过“Mesh Display”对话框显示所有网格，视图区出现两列车的交会网格。注意，

新导入的网格，其各边界的名称均带上“.1”，以区别于经旋转和平移操作后的初始网格，如图 4-105 所示。

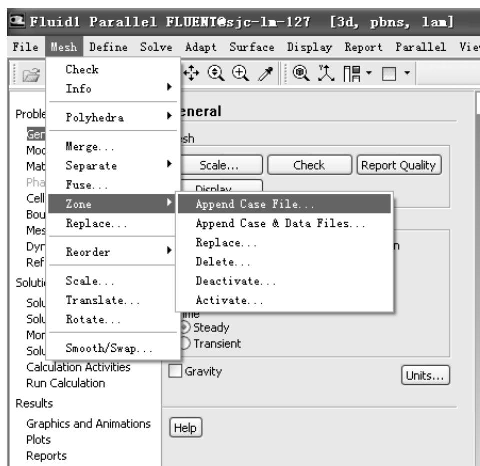


图 4-104　再次导入网格文件

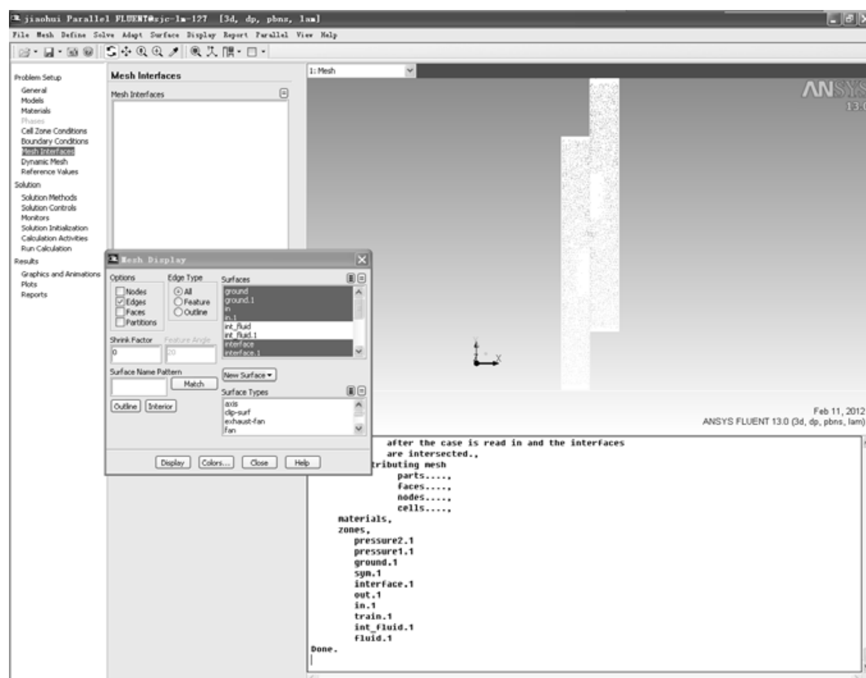


图 4-105　显示交会网格

2．模型的设置

1）设置模型。选择[Problem Setup]>[General]项，在“Time”栏中选择“Transient”，设置为瞬态计算模式。

2）设置湍流模型。选择[Problem Setup]>[Models]项，双击“Viscous-Laminar”项，在“Viscous Model”对话框中选择“k-epsilon(2 eqn)”项，在“k-epsilon Model”栏中选择“Realizable”项，如图 4-106 所示。

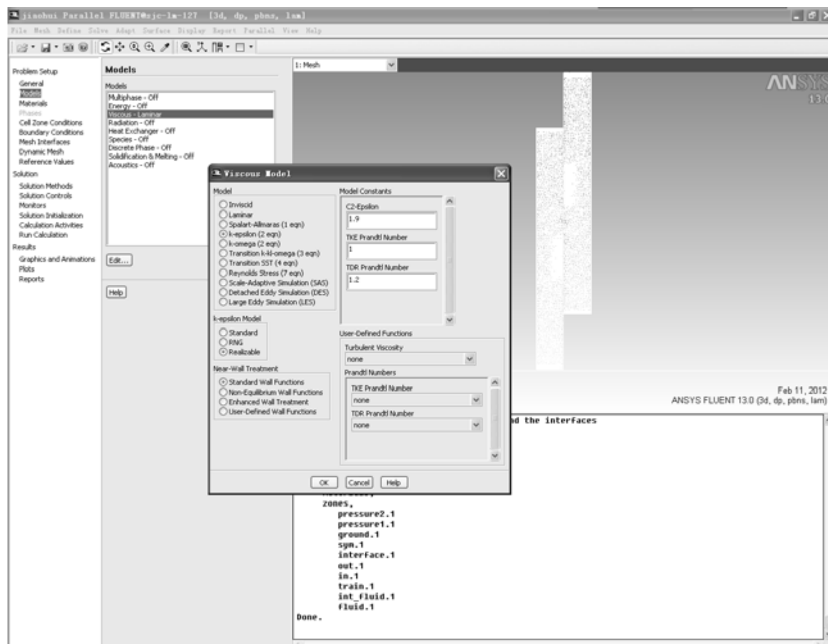


图 4-106　设置湍流模型

3）设置材料属性。选择[Problem Setup]>[Materials]项，在 Materials 工具栏中双击“Fluid”栏下的“air”项，在“Create/Edit Materials”对话框中设置“Density”为“ideal-gas”，其他为默认值，单击“Change/Create”按钮确定，如图 4-107 所示。此时查看[Problem Setup]> [Models]>[Energy]，可以看到该项已处于激活状态（ON）。

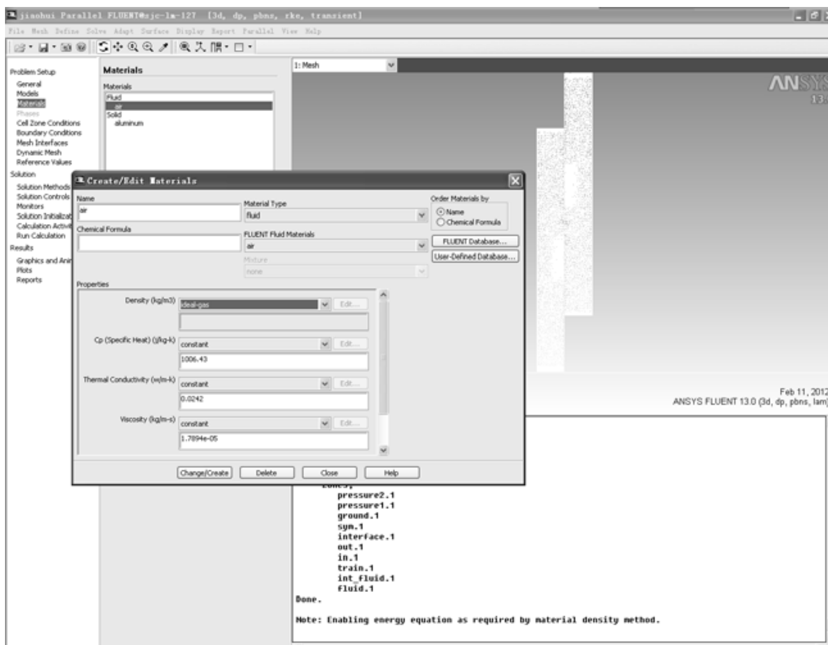


图 4-107　设置材料属性

3．边界条件的设置

1）选择[Problem Setup]> [Boundary Conditions]项，设置 in、in.1、out、out.1 边界为“Pressure-outlet”条件，设置 sym、sym.1 边界为“symmetry”条件，均保持默认设置。

2）生成交界面。选择[Problem Setup]> [Mesh Interfaces]项。单击“Create/Edit...”按钮，在“Create/Edit Mesh Interfaces”对话框中输入“interface”，并按图 4-108 分别在“Interface Zone 1”和“Interface Zone 2”中选择相对应的面网格，然后单击“Create”按钮，生成交界面。

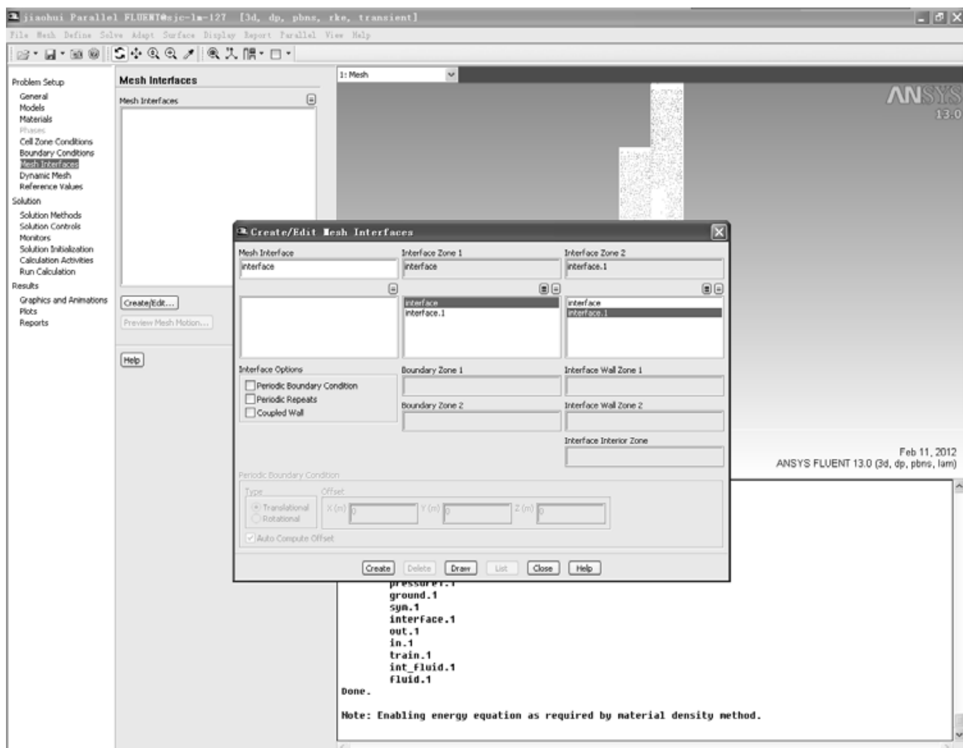


图 4-108　生成交界面

3）选择[Problem Setup]> [Reference Values]项，将“Area(m2)”项设置为 11。

4.4.3 求解条件的设置

1）设置车头区域压力监测点。如图 4-109 所示，选择[Solution] >[Monitors]项，单击“Surface Monitors”项下的“Create...”按钮。如图 4-109 所示，在弹出的“Surface Monitor”对话框中输入监测点名：p1；勾选“Plot”、“Write”选项。设置压力监测文件存储路径为“D：//P1.out”选项，选择“X Axis”为“Flow Time”；设置“Get Data Every”为“5”和“Time Step”；在界面右侧选择“Vertex Average（按顶点平均）”、“Pressure”、“Static Pressure”；在“Surfaces”里选择要监测的网格“pressure1”。单击“OK”按钮确定。

2）按照同样的办法设置车身区域压力监测点，将“pressure2”、“pressure3”、“pressure4”分别设置为 p2、p3、p4 监测点。

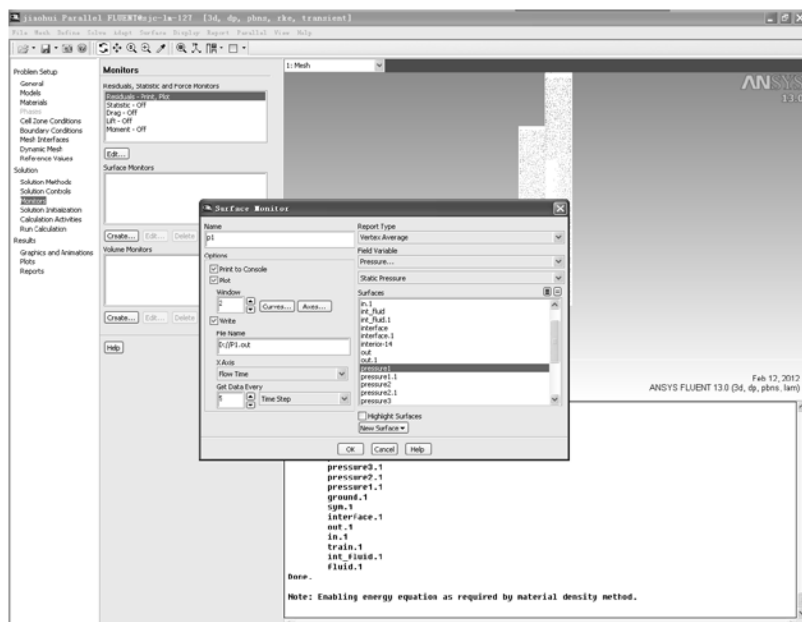


图 4−109　设置车头区域压力监测点

3）求解设置。选择[Solution] >[Solution Initialization]项，单击“Initialize”按钮，初始化计算项目。

4）设置网格滑移速度。选择[Problem Setup]>[Cell Zone Conditions]项，双击“fluid”项，在“Fluid”对话框中选择“Mesh Motion”项，将“Translational Velocity”栏的“Y(m/s)”项设置为 50，如图 4−110 所示。

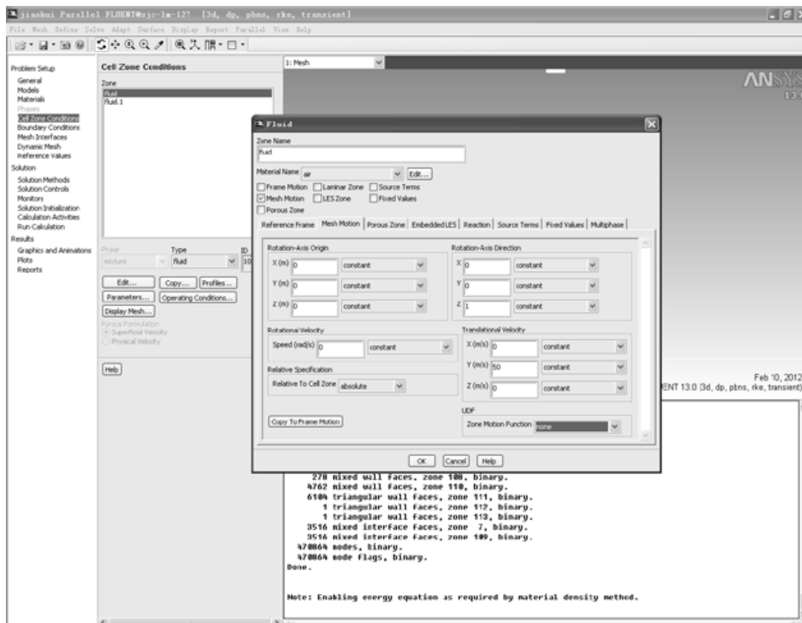


图 4−110　设置网格滑移速度

5）按照同样的方法设置“fluid2”项，在“Fluid”对话框中选择“Mesh Motion”项，将“Translational Velocity”栏的“Y(m/s)”项设置为-50。

6）设置迭代计算。选择[Solution] >[Run Calculation]项。如图 4-111 所示，在“Time Step Size(s)”选项里设置时间步长为 0.005s；在“Number of Time Steps”里设置总计算的步数为 200；其他保持默认值不变。本例保持内迭代次数为 20。

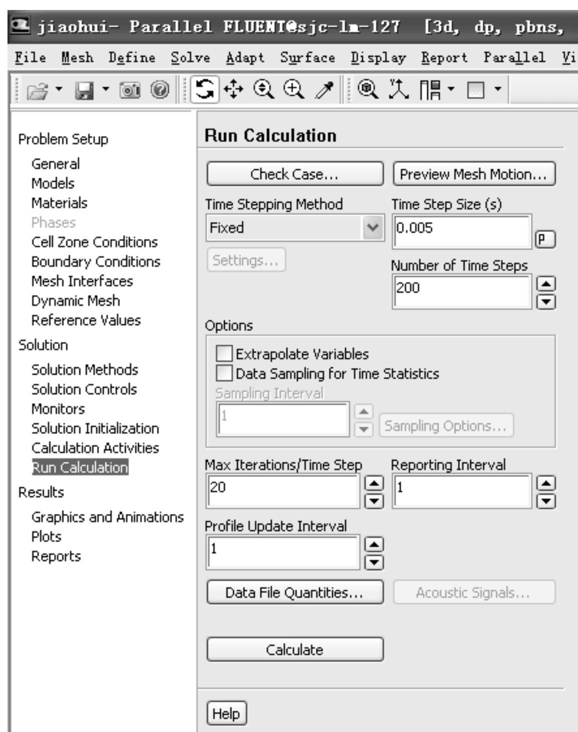


图 4-111 设置迭代计算

7）设置数据自动保存。选择[File] >[Write]>[Autosave...]菜单命令，在弹出的“Autosave”对话框中将“Save Data File Every(Time Steps)”项设置为 10，同时将“Append File Name with”项设置为“flow-time”，如图 4-112 所示。

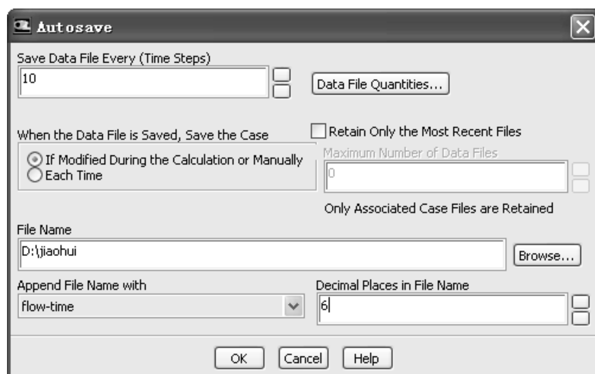


图 4-112 设置数据自动保存

8）选择[File]>[Write]>[Case...]菜单命令，将文件保存为“jiaohui.cas”。

9）单击“Calculate”按钮，开始计算。如图 4-113 所示，计算机开始记录“P1.out”、“P2.out”这两个压力监测文件和“jiaohui-1-0.050000.cas”、“jiaohui-1-0.05000.dat”这两个计算结果文件（每隔 20 步将增加一份这样的文件，命名规律大致为 jiaohui-1-0.050000.cas、jiaohui-1-0.100000.cas、jiaohui-1-0.150000.cas...，由于这些文件容量太大，所以光盘中不再提供）。

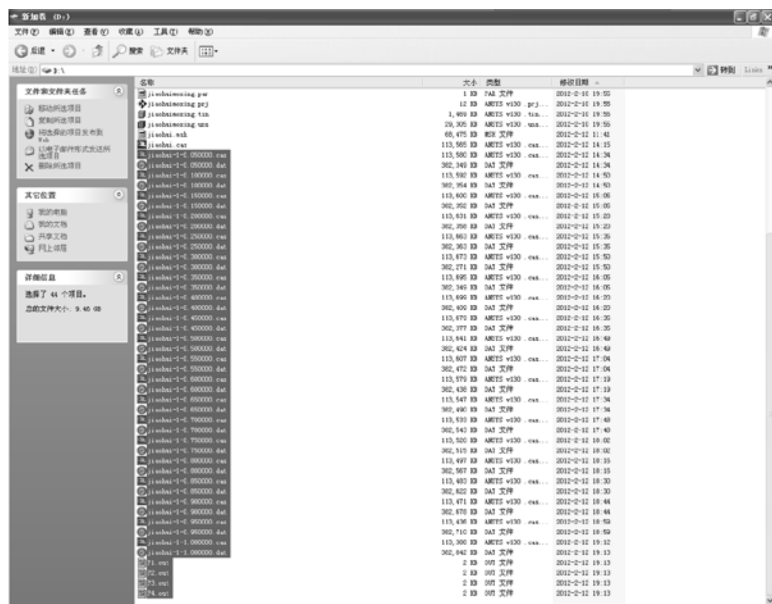


图 4-113　记录文件

计算完成后的网格相对位置如图 4-114 所示。



图 4-114　计算完成后的网格相对位置

P1～P4 点的压力监测曲线如图 4-115~图 4-118 所示。

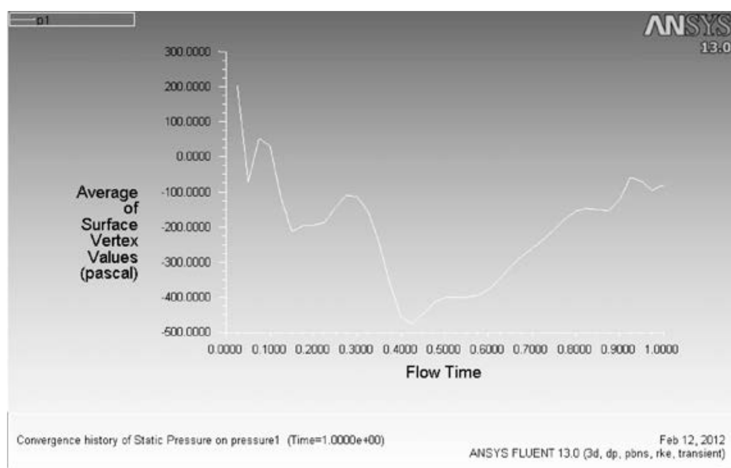


图 4–115 p1 点的压力监测曲线

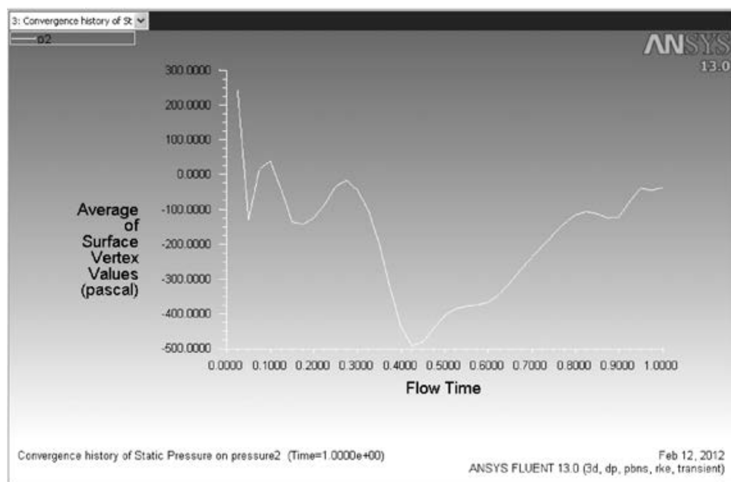


图 4–116 p2 点的压力监测曲线

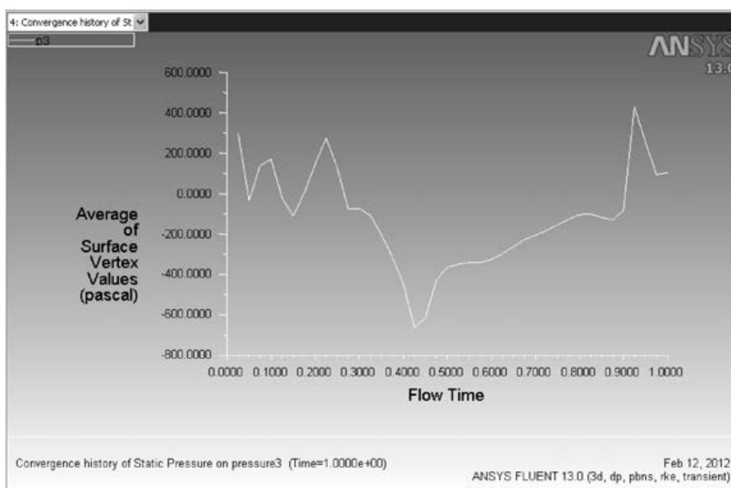


图 4–117 p3 点的压力监测曲线



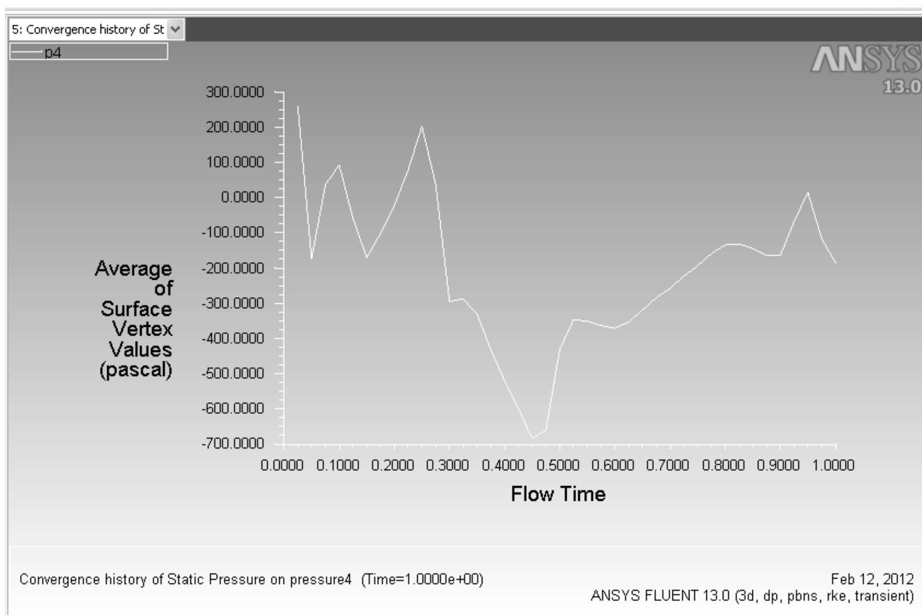


图 4-118　p4 点的压力监测曲线

4.4.4 计算结果后处理

1）打开 CFD-Post 后处理软件，选择[File]>[Load Results...]菜单命令，打开最后一个 cas 文件“jiaohui-1-1.000000.cas”，如图 4-119 所示。

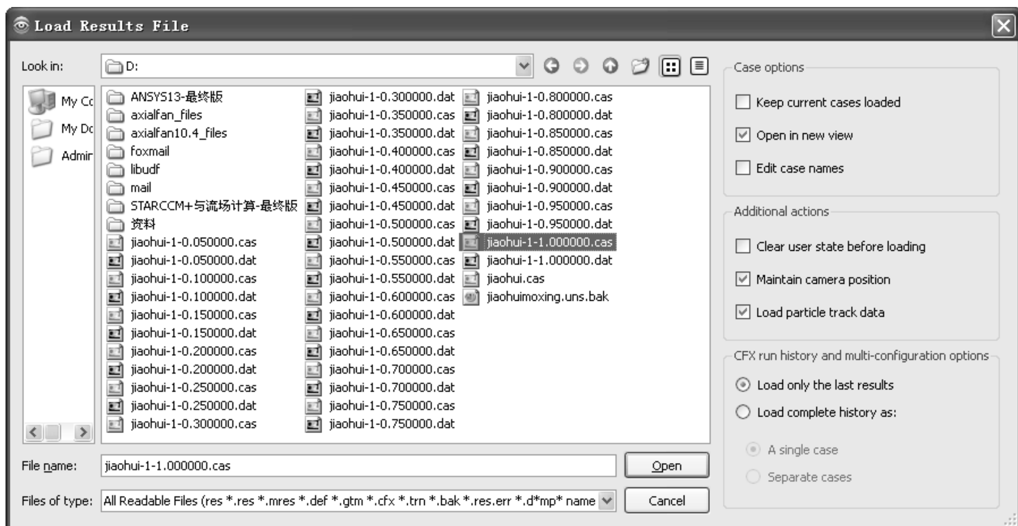


图 4-119　打开 cas 文件

2）显示列车表面压力云图。单击工具栏按钮，新建压力云图“jiaohui”。如图 4-120 所示，在属性栏中单击“Domains”栏右侧的按钮，选择“fluid”和“fluid.1”两个区域。

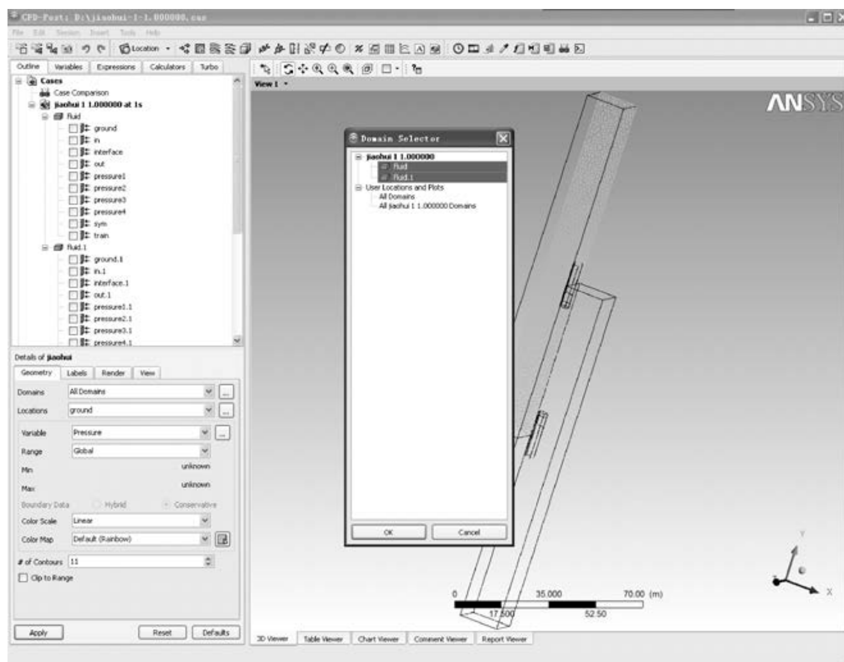


图 4-120 选择计算域

按同样的方法在“Locations”栏选择“train”和“train.1”两个边界，同时将“Range”项设置为“Local”方式，将“# of Contours”设置为 21。单击“Apply”按钮生成压力云图，如图 4-121 所示。

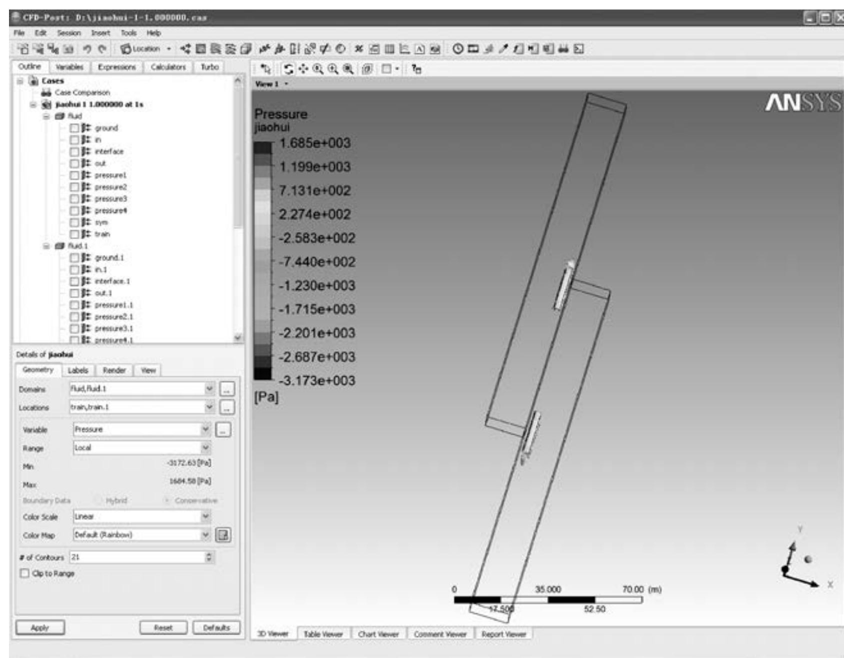


图 4-121 生成压力云图

单击工具栏按钮，打开“Timestep Selector”对话框。然后单击右侧的，在“Animation”对话框中勾选“Save Movie”项，将保存路径设置为“D:/jiaohui.wmv”，同时选择“Loop”方式并调节播放速度至接近 slow，如图 4−122 所示。

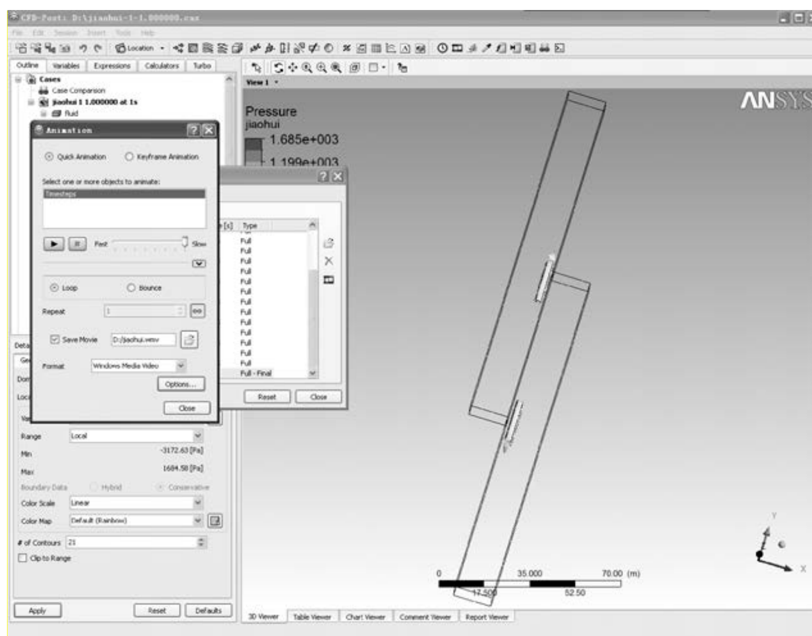


图 4−122　设置动画

单击动画播放按钮，视图区依次出现各个 cas 文件对应的列车表面压力云图。单击停止按钮，动画文件“jiaohui.wmv”保存于硬盘中。

第 5 章　无预混燃烧

本章主要内容：

本章主要介绍 FLUENT 软件在燃烧以及化学反应方面的应用，并且讲解一个无预混燃烧的实例。通过本章的学习，读者可以利用 FLUNET 求解工程实践中的燃烧以及化学反应问题。

本章学习目标：

✧ 了解无预混燃烧的基本知识。

✧ 掌握无预混燃烧计算设置流程求解及后处理的技巧。

本章针对天然气在一个 300 kW 的漩涡稳定燃烧器中燃烧的情况进行计算。该炉为垂直发射、八边形横截面，包含一个圆锥形的炉罩和一个圆柱形的排气管。炉壁采用耐火材料内衬或水冷。燃烧器包含 24 径向燃料端口和一个中心挡板。空气经由一个环形入口引入，可动漩涡产生器用于产生漩涡。

燃烧室为一个二维轴对称假设的燃烧器，其尺寸示意图如图 5-1 所示。各边界的输入曲线，气体的速度入口边界条件和温度边界条件均基于实验数据。

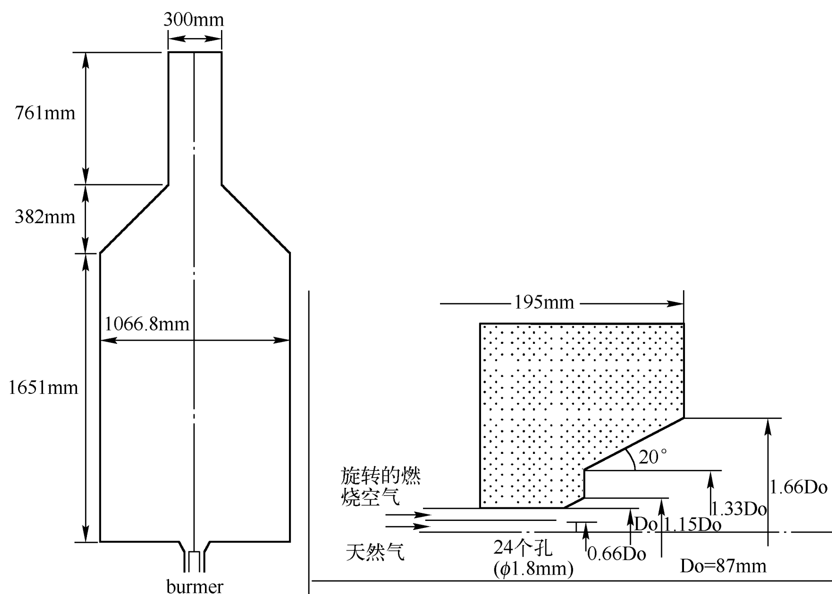


图 5-1 燃烧室尺寸

5.1　无预混燃烧概述

在无预混燃烧中，燃料和氧化剂以相异流进入反应区，这与预混燃烧系统截然不同。在

预混燃烧系统中，反应物在燃烧以前以分子水平混合。无预混燃烧的例子包括甲烷燃烧、粉煤炉和内部燃烧柴油（压缩）发动机。

在一定假设条件下，热化学可减少为一个单一的参数——混合分数。混合分数用f表示，是来自燃料流的质量分数。换句话说，混合分数就是在所有组分（如CO_2、H_2O、O_2等）里，燃烧和未燃烧燃料流元素（如C、H等）的局部质量分数。因为化学反应中的元素是守恒的，所以这种方法极好。反过来，质量分数是一个守恒的数量，因此其控制输运方程不含源项。燃烧被简化为一个混合问题。一经混合，即可用层流小火焰（Laminar Flamelet）模型将化学反应模拟成为化学平衡或近化学平衡。

1. 平衡混合分数 / PDF 模型

无预混模拟方法包括解一或两个守恒量（混合分数）的输运方程，不解单个组分方程。而每个组分的浓度通过预混分数场得到。热化学计算在 prePDF 中进行，并列成表，以便于在 FLUENT 中查询。紊流和化学的相互作用考虑为一个概率（几率）密度函数（PDF）。

2. 无预混方法的优点

无预混模拟方法已被明确用于模拟进行快速化学反应的紊态扩散火焰的研究。无预混模型允许预测中间（基本）组分、溶解效应和严格的紊流化学耦合。因为不需要解大量的组分输运方程，该方法在计算上很有效。当潜在的假设有效时，无预混方法要优先于有限率公式。

3. 无预混方法的局限

无预混方法仅能用于当反应流动系统满足以下几个要求时：

1）流动是湍流。

2）反应系统包括一个燃料流、一个氧化剂流，并且随意包括一个次要流（另外一个燃料或氧化剂，或者一个非反应流）。

3）化学动力学必须迅速，以使流动接近化学平衡。

注意：无预混模型仅能与分离求解器使用，不能与耦合求解器使用。

5.2 模型设置

启动 FLUENT 软件，在“FLUENT Launcher”对话框中选择 2D 二维计算模式，激活“Double Precision”双精度模式，选中“Serial”选项，如图 5-2 所示。

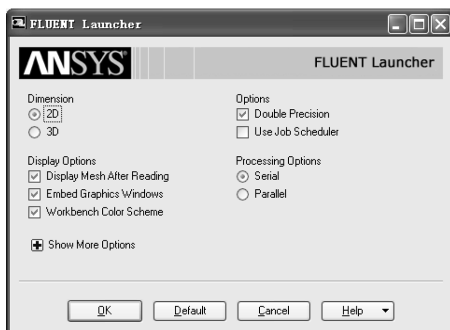


图 5-2　FLUENT 启动界面

1．网格导入及检查

1）选择[File]>[Read]>[Mesh…]菜单命令，打开文件名“berl.mesh”读取网格，如图 5-3 和图 5-4 所示，单击“OK”按钮确认操作。

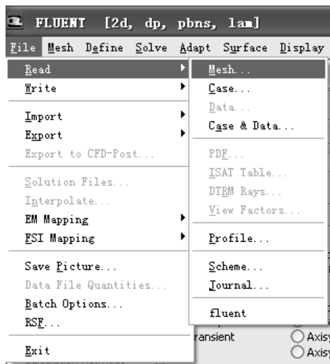


图 5-3 读取网格



图 5-4 输入文件名

2）单击左侧树形菜单中的[Problem Setup]>[General]>[Check]项，软件右下侧显示出网格检查结果，如图 5-5 所示。注意，报告中的 minimum volume 项应为正值。

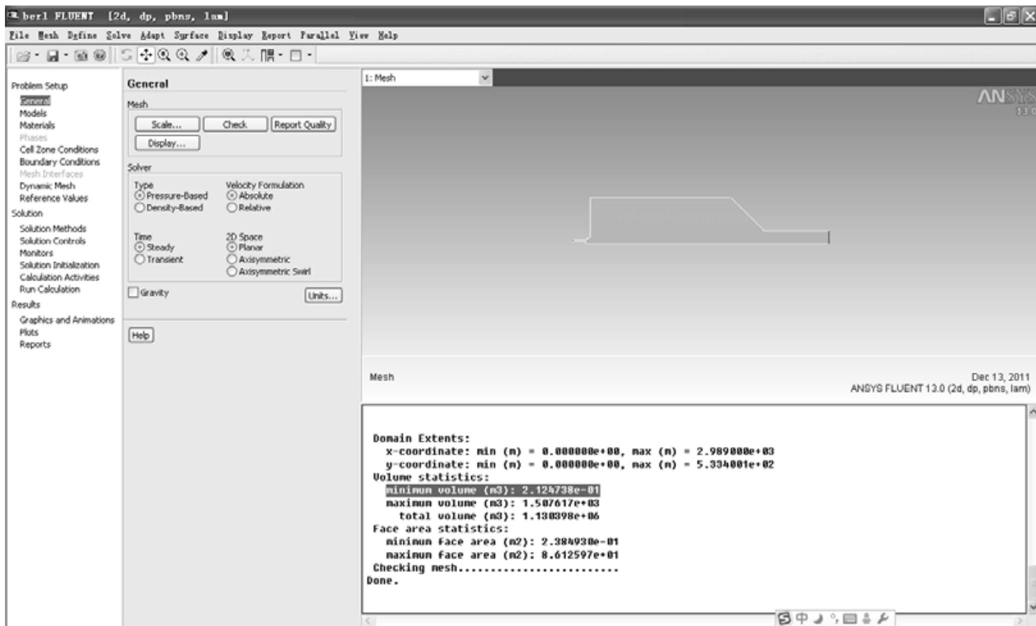


图 5-5 网格检查

3）单击左侧树形菜单中的[Problem Setup]>[General]>[Scale…]项，弹出“Scale Mesh”对话框，如图 5-6 所示。将“View Length Unit In”项修改为“mm”，同时将“Mesh Was Created In”项修改为“mm”。单击“Scale”按钮，“Domain Extents”栏中的坐标范围修改为如图 5-6 所示的值。

4）再次单击左侧树形菜单中的[Problem Setup]>[General]>[Check]项，对网格质量进行



检查。

5）下面对导入的网格进行镜像处理，单击菜单项[Display]>[Graphics and Animations…]或树形菜单项[Results]>[Graphics and Animations]，如图 5-7 所示。

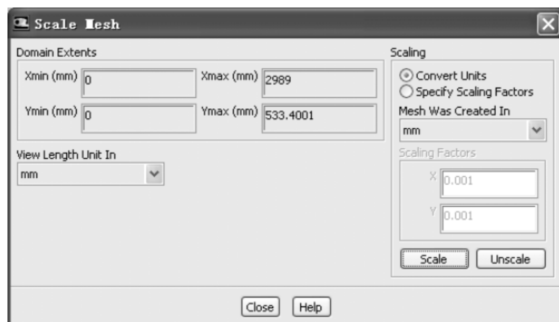


图 5-6 坐标的修改

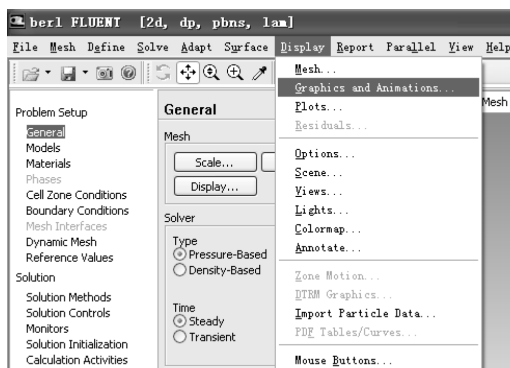


图 5-7 Graphics and Animations

6）单击“Views…”按钮，弹出“Views”对话框，如图 5-8 所示。在“Mirror Planes”栏中选择“axis-2”项，单击“Apply”按钮，视图区中的网格完成镜像。

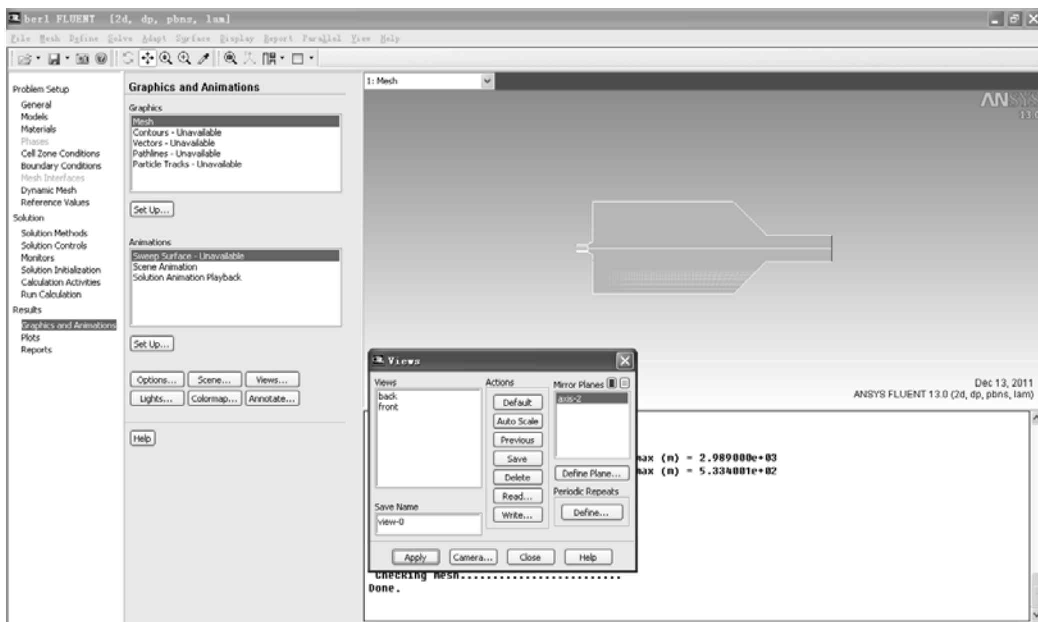


图 5-8 “Views”对话框

7）更改计算模型，选择“Type”栏中的“Pressure-Based”项，同时选择“2D Space”栏中的“Axisymmetric Swirl”项，如图 5-9 所示。

2．设置模型

1）双击树形菜单中的[Problem Setup]> [Models]>[Energy]>[Edit...]项，弹出“Energy”对话框，激活“Energy Equation”项，如图 5-10 所示。单击“OK”按钮确认操作。

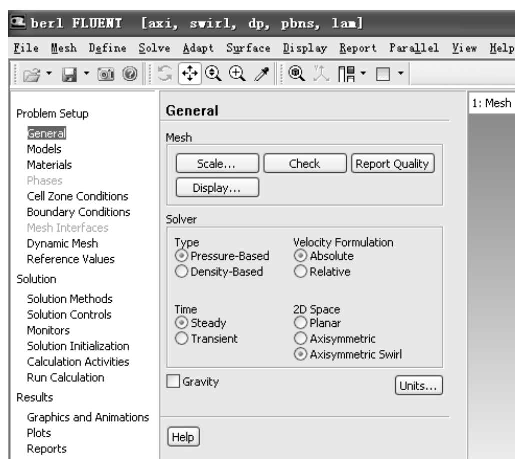


图 5-9　更改计算模型

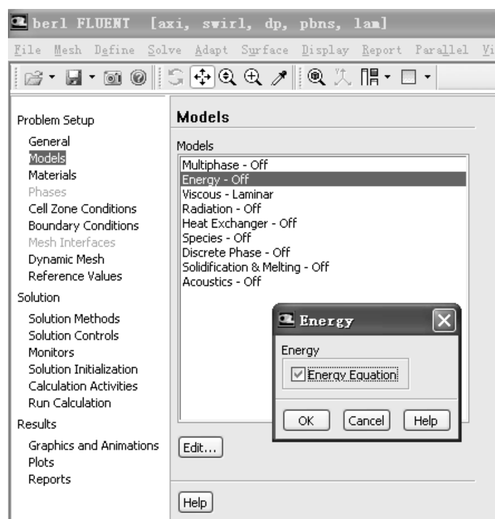


图 5-10　激活“Energy Equation”项

2）双击树形菜单中的[Problem Setup]> [Models]>[Viscous]>[Edit...]项，弹出“Viscous Model”对话框，在“Model”栏中选中“k-epsilon (2 eqn)”项，如图 5-11 所示。其预设值保持不变，单击“OK”按钮确认操作。

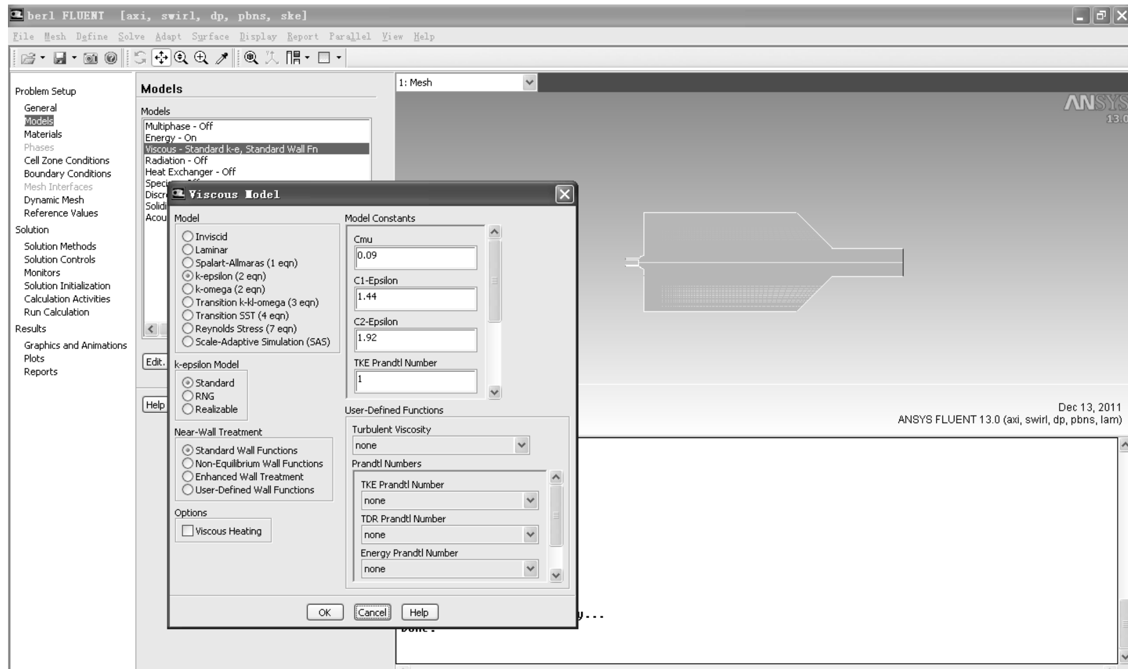


图 5-11　选中“k-epsilon”项

3）双击树形菜单中的[Problem Setup]> [Models]>[Radiation]>[Edit...]项，弹出“Radiation Model”对话框，在“Model”栏中选中“P1”项，如图 5-12 所示。其预设值保持不变，单击“OK”按钮确认操作。



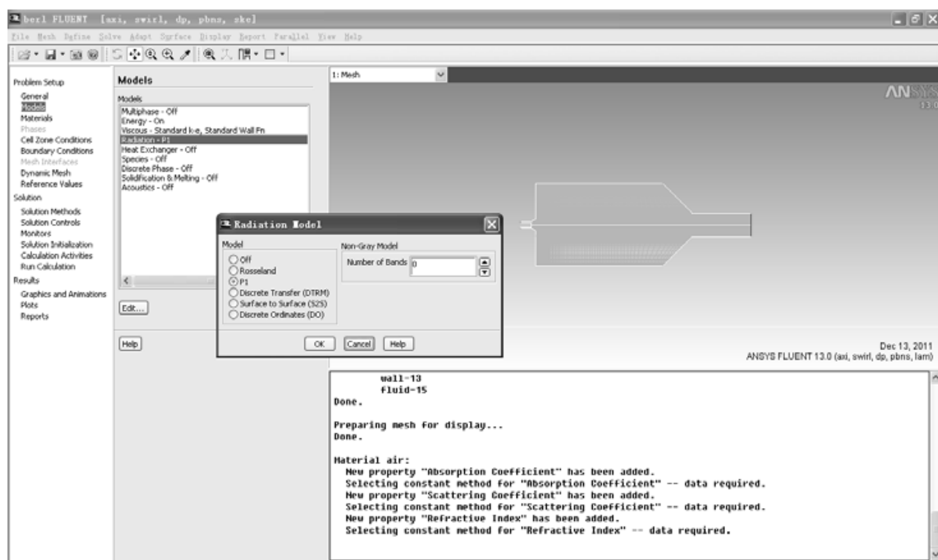


图 5-12 选中“P1”项

4）此时，软件自动弹出如图 5-13 所示的确认信息，提醒用户确认已经更改的材料属性和求解方法。

5）双击树形菜单中的[Problem Setup]>[Models]>[Species]>[Edit...]项，弹出“Species Model”对话框，在“Model”栏中选中“Non-Premixed Combustion”项，如图 5-14 所示。其预设值保持不变。

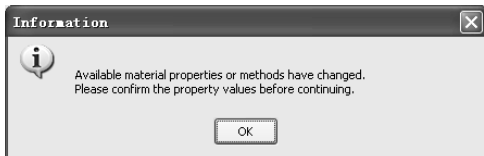


图 5-13 确认信息

6）在“PDF Options”栏中激活“Inlet Diffusion”项，在进口设置进口扩散选项。

7）在“PDF Table Creation”栏中的“Chemistry”tab 页中默认选择“Equilibrium”和“Non-Adiabatic”项，将“Fuel Stream Rich Flammability Limit”项设置为 0.064，其余选项保持不变，如图 5-14 所示。

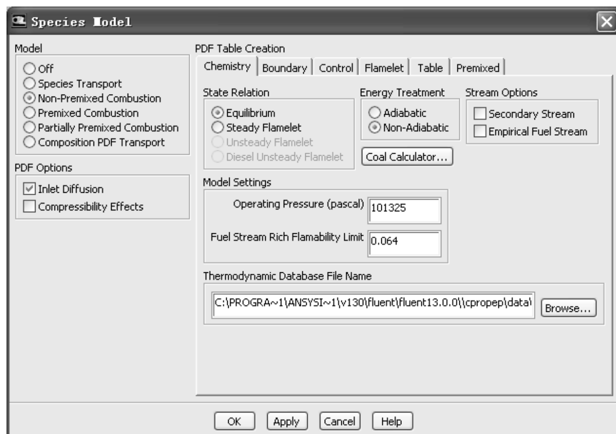


图 5-14 “Species Model”对话框

8）切换到“Boundary”Tab页，在“Boundary Species”项中输入“c2h6”，单击“Add”按钮添加该材料，如图 5–15 所示。重复以上操作，添加C_3H_8、C_4H_{10}和CO_2这 3 种材料。

9）在“Specify Species in”项中选择“Mole Fraction”项，采用摩尔分数表达方式设置氧气浓度，如图 5–16 所示。本例中保持N_2和O_2的比例为默认设置。

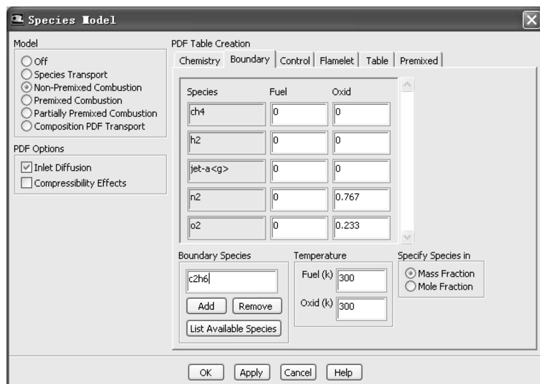


图 5–15 添加燃烧相关材料

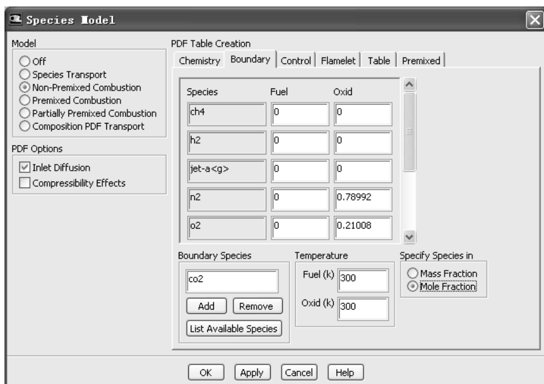


图 5–16 设置氧气浓度

10）依次输入燃油“Fuel”各项的摩尔分数，见表 5–1。

11）将“Fuel”和“Oxid”两项的温度均设置为315K，如图 5–17 所示。

12）切换到“Table”Tab 页，保持默认设置，单击“Calculate PDF Table”按钮进行非绝热 PDF Table 计算，如图 5–18 所示。

表 5–1 燃油“Fuel”各项的摩尔分数

材料种类	摩尔分数
CH_4	0.965
N_2	0.013
C_2H_6	0.017
C_3H_8	0.001
C_4H_{10}	0.001
CO_2	0.003

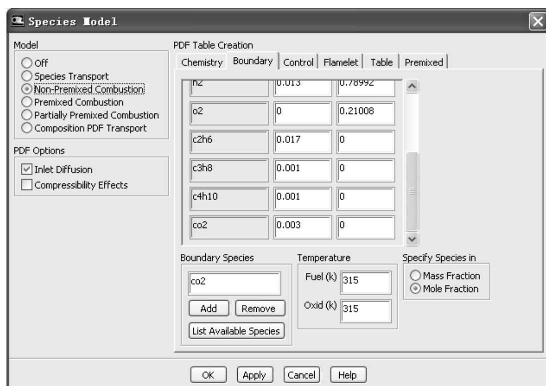


图 5–17 温度设置

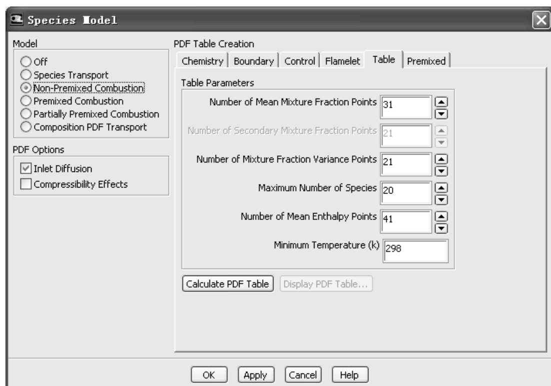


图 5–18 PDF Table 计算

13）完成计算后，“Display PDF Table...”按钮被激活，如图 5–19 所示。

14）单击“Display PDF Table...”按钮，打开“PDF Table”对话框，如图 5–20 所示。保持默认设置，单击“Display”按钮，视图区显示出图 5–20 中设置对应截面的温度分布。单击“Close”按钮退出。单击“OK”按钮确认操作。



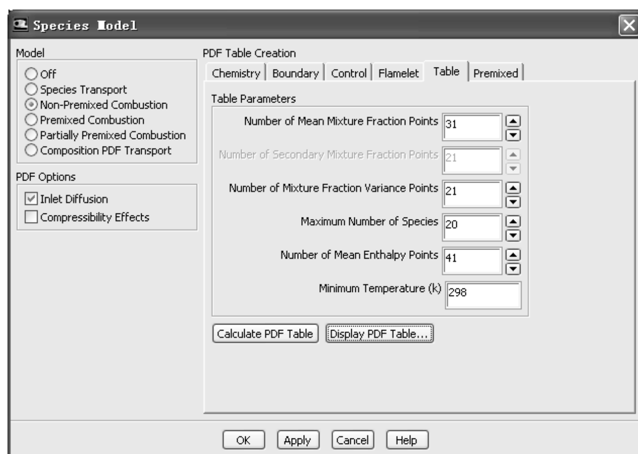


图 5-19　激活“Display PDF Table...”按钮

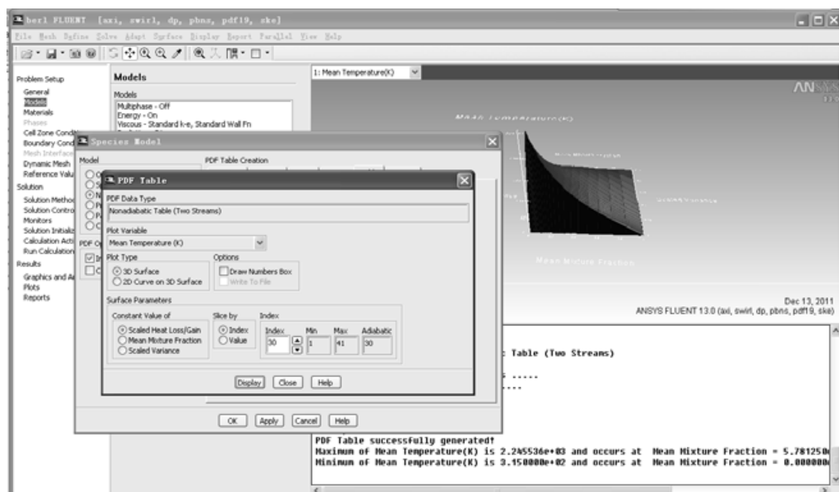


图 5-20　温度分布设置

15）选择[File]>[Write]>[PDF...]菜单命令，保存 PDF 文件，如图 5-21 所示。

16）在弹出的“Select File”对话框中选择默认的文件名，单击“OK”按钮完成保存，如图 5-22 所示。

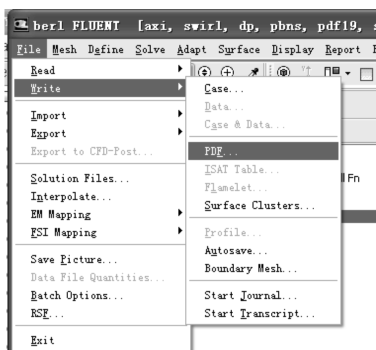


图 5-21　保存 PDF 文件

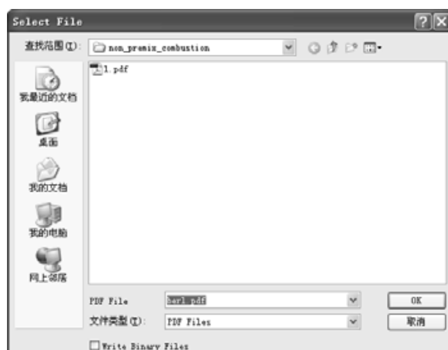


图 5-22　选择默认的文件名

17）单击“OK”按钮，退出“Species Model”对话框。

3．设置材料属性

1）选择树形菜单中的[Problem Setup]>[Materials]>[pdf-mixture]>[Create/Edit...]项，打开“Create/Edit Materials”对话框，如图 5−23 所示。

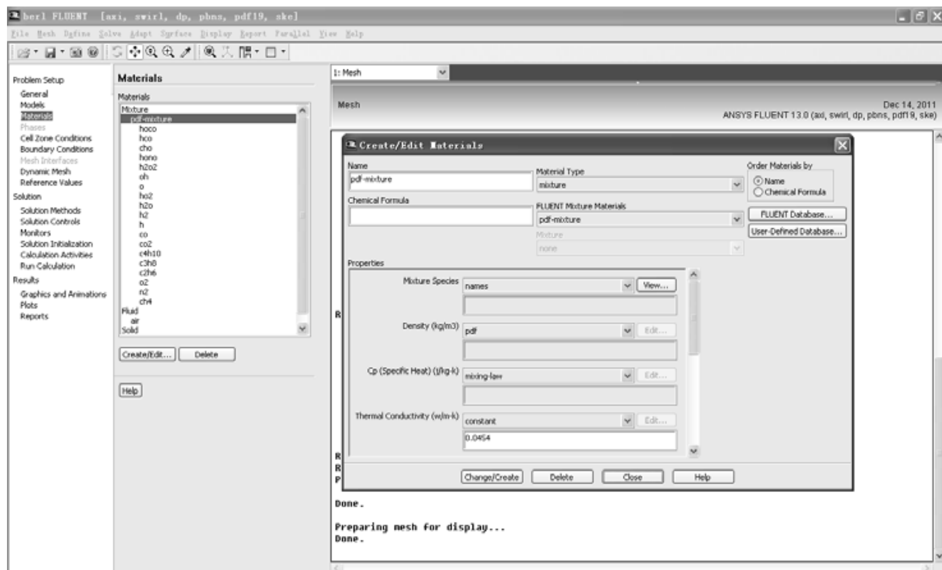


图 5−23 “Create/Edit Materials”对话框

2）在图 5−23 所示的对话框中可以设置材料的热物性参数。在“Absorption Coefficient”栏中选择“wsggm-domain-based”项，单击“Change/Create”按钮，如图 5−24 所示。单击“Close”按钮退出。

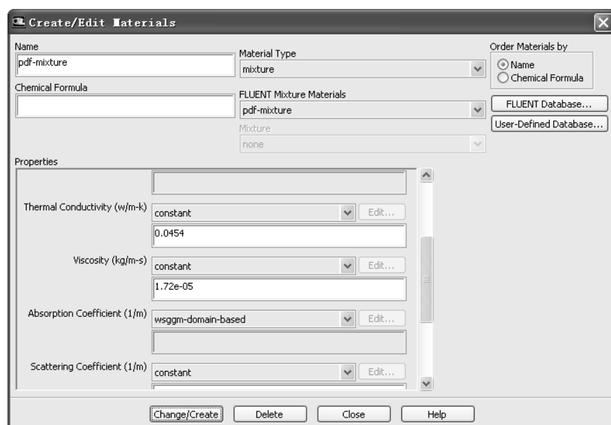


图 5−24 设置“Absorption Coefficient”

4．设置边界条件

1）选择[File]>[Read]>[Profile...]菜单命令，选择“berl.prof”，导入数据曲线，如图 5−25 所示。



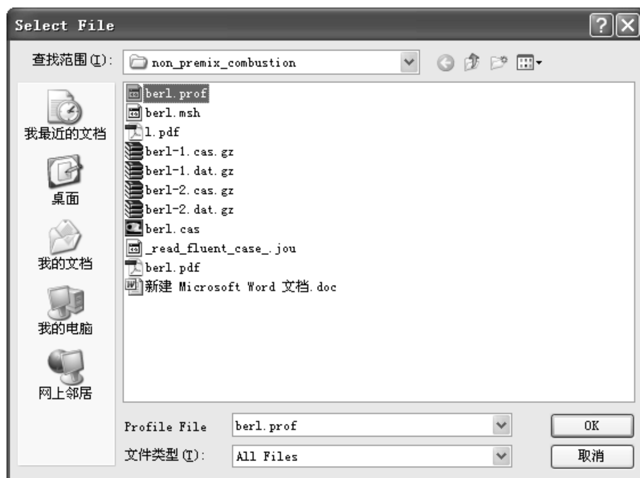


图 5-25　导入数据曲线

2）保持树形菜单[Problem Setup]>[Boundary Conditions]>[poutlet-3]项为“pressure-outlet”条件。选择[Problem Setup]>[Boundary Conditions]>[poutlet-3]>[Edit...]项，打开“Pressure Outlet”对话框，如图 5-26 所示。

3）设置出口回流条件。将“Specification Method”项设置为“Intensity and Hydraulic Diameter”方式，同时将“Backflow Turbulent Intensity(%)”项设置为 5，将“Backflow Hydraulic Diameter(mm)”项设置为 600，如图 5-27 所示。

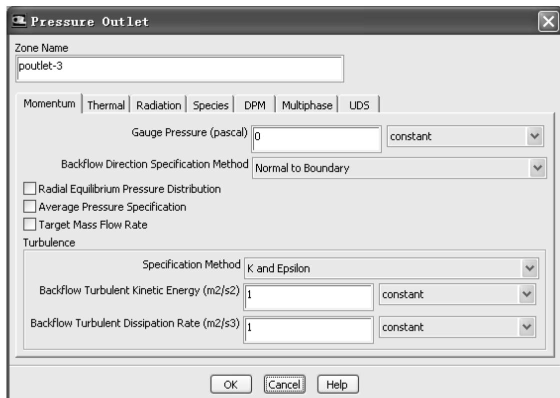


图 5-26 “Pressure Outlet”对话框

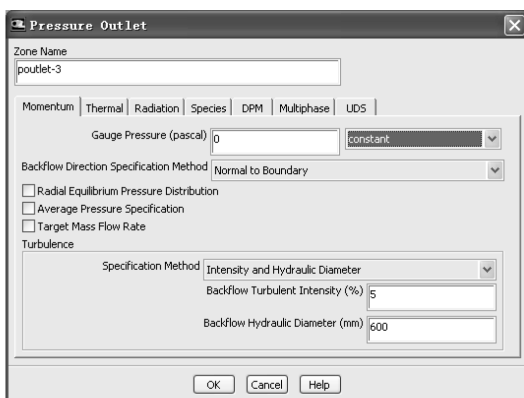


图 5-27　设置出口回流条件

4）设置出口温度条件。切换到“Thermal”tab 页，将“Backflow Total Temperature(K)”项设置为 1310，如图 5-28 所示。单击“OK”按钮确认操作。

5）保持树形菜单中的[Problem Setup]>[Boundary Conditions]>[air-inlet-4]项为“velocity-inlet”条件。选择[Problem Setup]>[Boundary Conditions]>[air-inlet-4]>[Edit...]项，打开“Velocity Inlet”对话框，如图 5-29 所示。

6）将“Velocity Specification Method”项设置为“Components”，将“Axial-Velocity”项设置为“vel-prof u”，将“Radial-Velocity”项设置为“vel-prof w”。设置入口湍流条件，将

“Specification Method”项设置为“Intensity and Hydraulic Diameter”，同时将“Turbulent Intensity(%)”项设置为“17”，将“Hydraulic Diameter（mm）”项设置为“29”，如图 5-30 所示。

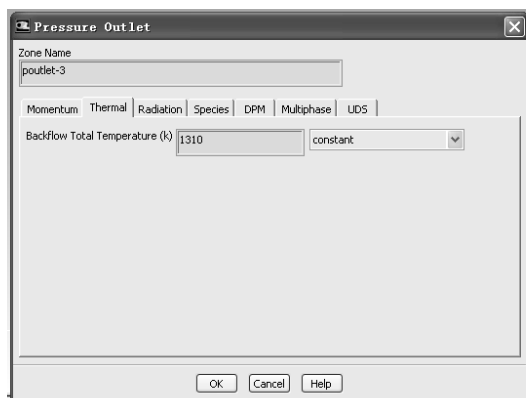


图 5-28 设置出口温度条件

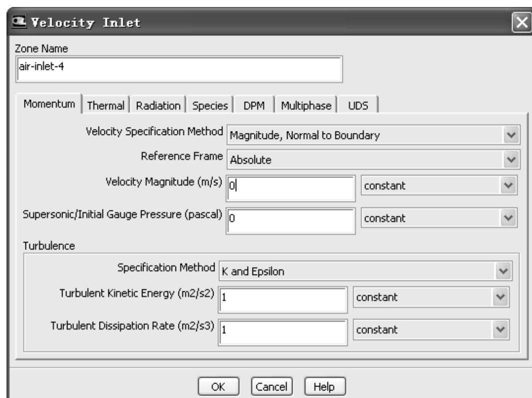


图 5-29 设置 air-inlet-4 入口条件

7）设置入口温度条件。切换到“Thermal”tab 页，将“Temperature(K)”项设置为 322，如图 5-31 所示。单击“OK”按钮确认操作。

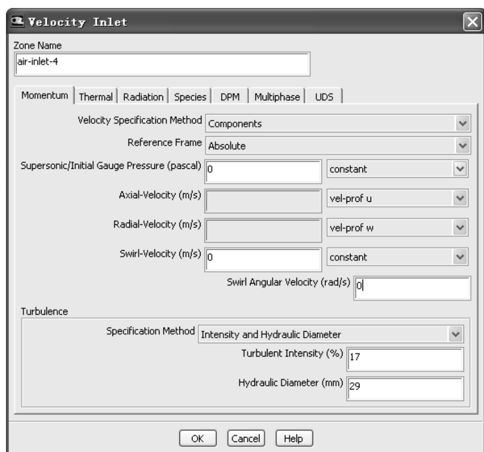


图 5-30 设置 air -inlet-4 入口湍流条件

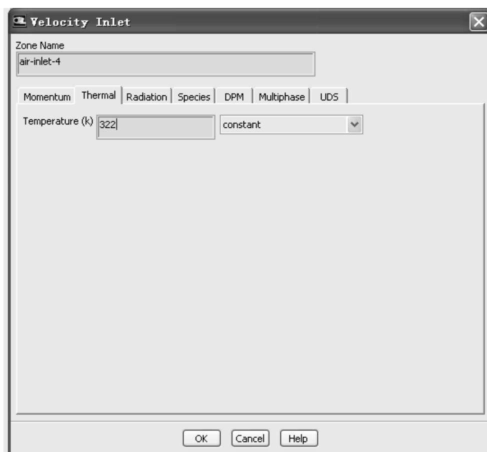


图 5-31 设置 air -inlet-4 入口温度条件

8）保持树形菜单中的[Problem Setup]>[Boundary Conditions]>[fuel-inlet-5]项为“velocity-inlet”条件。选择[Problem Setup]>[Boundary Conditions]>[fuel-inlet-5]>[Edit...]项，打开“Velocity Inlet”对话框。

9）将“Velocity Specification Method”项设置为“Components”，将“Radial-Velocity（m/s）”项设置为“157.25”，将“Specification Method”项设置为“Intensity and Hydraulic Diameter”，同时将“Turbulent Intensity(%)”项设置为“5”，将“Hydraulic Diameter（mm）”项设置为“1.8”，如图 5-32 所示。

10）切换到“Thermal”tab 页，将“Temperature(K)”项设置为 318，如图 5-33 所示。

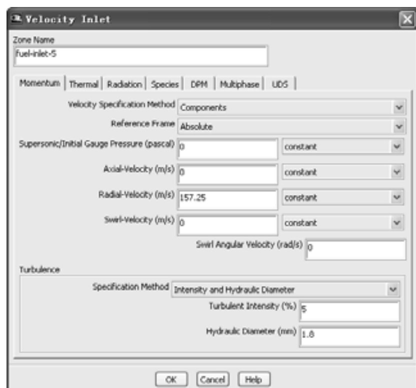


图 5-32　设置 fuel-inlet-5 入口湍流条件



图 5-33　设置 fuel-inlet-5 入口温度条件

11）切换到“Species”tab 页，将“Mean Mixture Fraction”项设置为 1，如图 5-34 所示。单击“OK”按钮确认操作。

12）保持树形菜单中的[Problem Setup]>[Boundary Conditions]>[wall-6]项为“wall”条件。选择[Problem Setup]>[Boundary Conditions]>[wall-6]>[Edit...]项，打开“Wall”对话框，如图 5-35 所示。

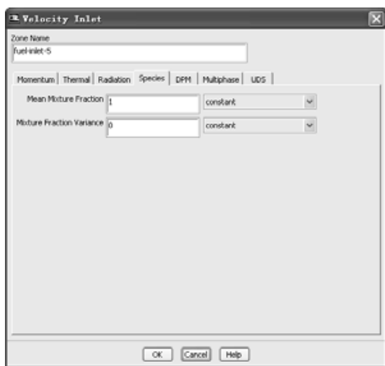


图 5-34　设置“Mean Mixture Fraction”条件

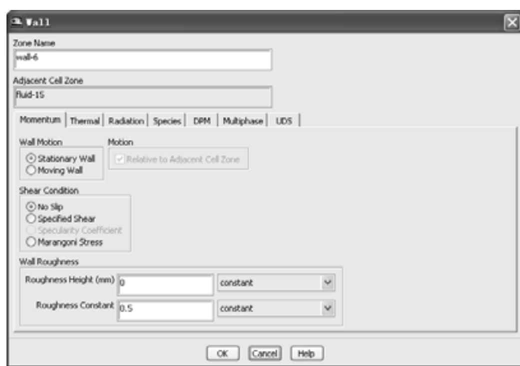


图 5-35　设置 wall-6 壁面条件

13）切换到“Thermal”tab 页，将“ Thermal Conditions”项设置为“Temperature”，将“Temperature(K)”项设置为“1375”，将“Internal Emissivity”项设置为“0.55”，如图 5-36 所示。单击“OK”按钮确认操作。

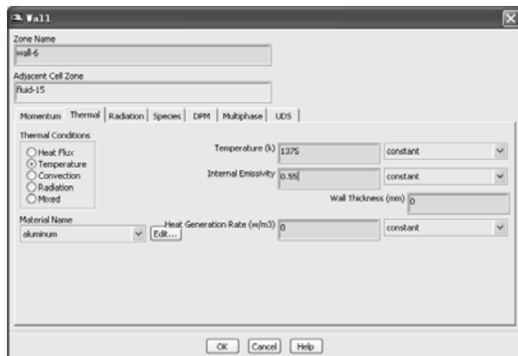


图 5-36　设置 wall-6 壁面温度和发射率

14）重复以上操作，设置其余 Wall 边界，见表 5-2。

表 5-2　设置其余 Wall 边界

边界名（Zone Name）	温度（Temperature (K)）	内部发射率（Internal Emissivity）
wall-7	322	0.55
wall-8	1315	0.55
wall-9	temp-prof t (from the drop-down list)	0.55
wall-10	1115	0.55
wall-11	1275	0.55
wall-12	1178	0.55
wall-13	1178	0.55

15）选择[Results]>[Plots]>[Profile Data]>[Set Up...]项，打开“Plot Profile Data”对话框，如图 5-37 所示。在“Profile”栏中选择“temp-prof”项（对应边界为 wall-9），同时分别保持“Y Axis Function”项为“t”，保持“X Axis Function”项为“x”。

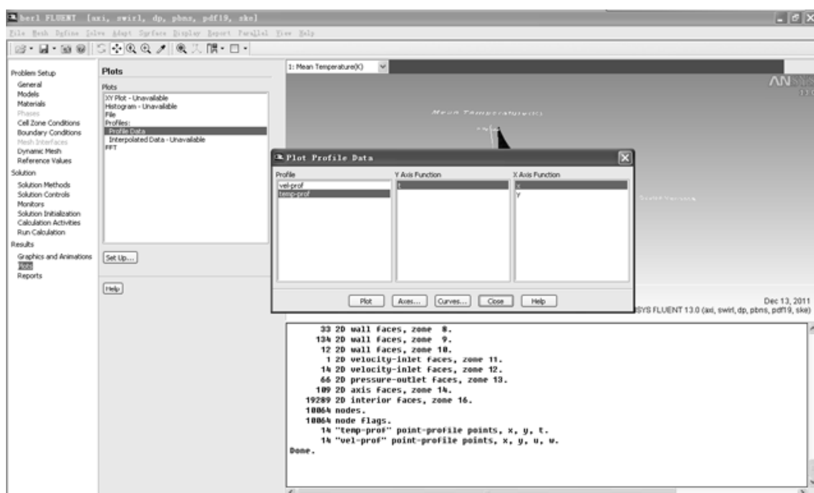


图 5-37　选择“temp-prof”项

16）单击“Plot”按钮，绘制曲线，如图 5-38 所示。

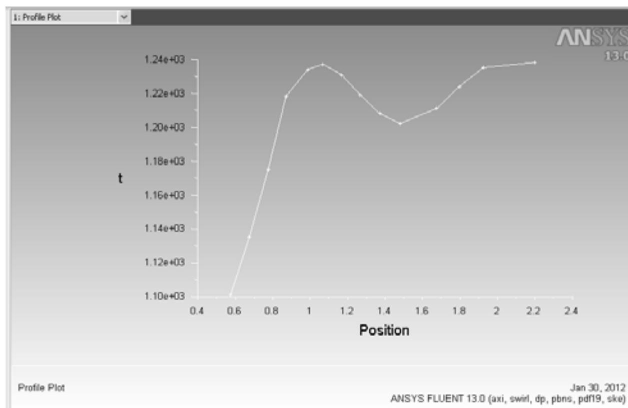


图 5-38　绘制曲线

17）在“Plot Profile Data”对话框的“Profile”栏中选择“vel-prof”项（对应边界为 air-inlet-4），同时分别保持“Y Axis Function”项为“u”，选择“X Axis Function”项为“y”。单击“Plot”按钮，视图区出现相应的曲线，如图 5-39 所示。

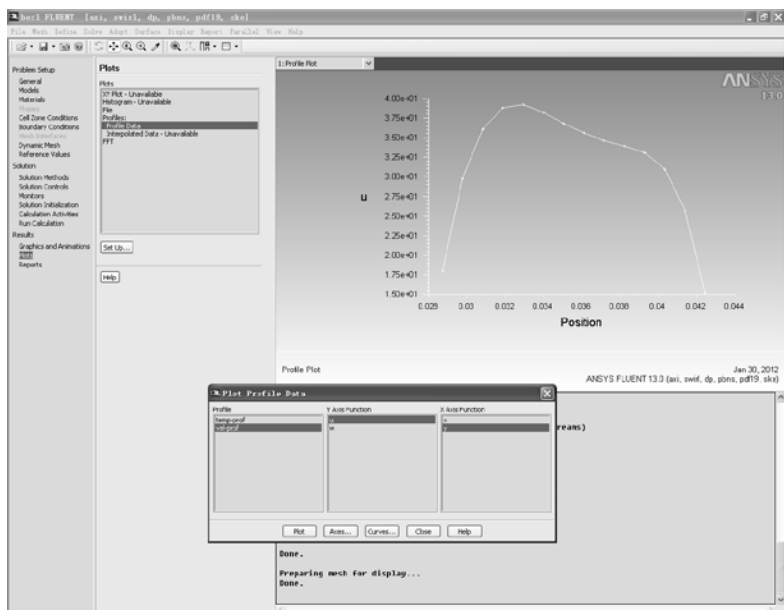


图 5-39　选择“vel-prof”项

18）将图 5-39 中的“Y Axis Function”项设置为“w”，将“X Axis Function”项设置为“y”。单击“Plot”按钮，绘制曲线，如图 5-40 所示。

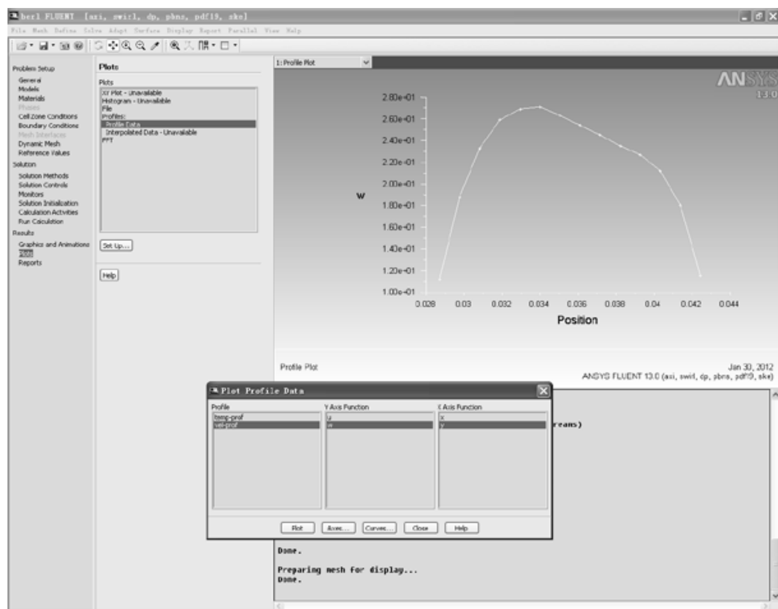


图 5-40　绘制曲线

5．设置操作工况

选择树形菜单中的[Problem Setup]>[Boundary Conditions]>[Operating Conditions...]项，弹出“Operating Conditions”对话框，如图 5-41 所示。保持默认设置不变。

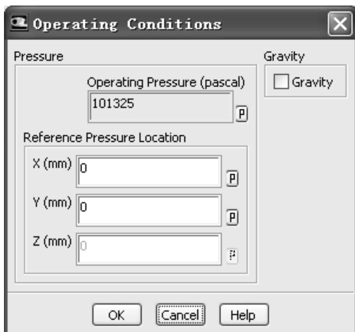


图 5-41　设置操作工况

5.3　模型求解

1）选择树形菜单中的[Solution]>[Solution Methods]项，其设置如图 5-42 所示。

2）修改模型求解设置，将“Scheme”项设置为“Coupled”方式。

3）在“Spatial Discretization”栏中保持“Gradient”项不变，将“Pressure”项设置为“PRESTO!”，将除“Mixture Fraction Variance”外的其余项设置为“Second Order Upwind”，如图 5-43 所示。

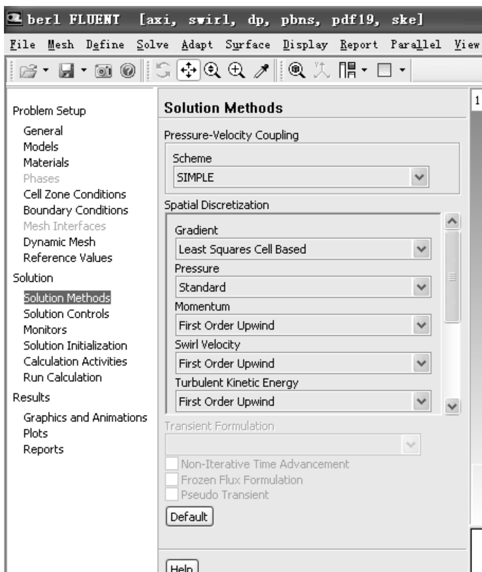


图 5-42　Solution Methods 设置

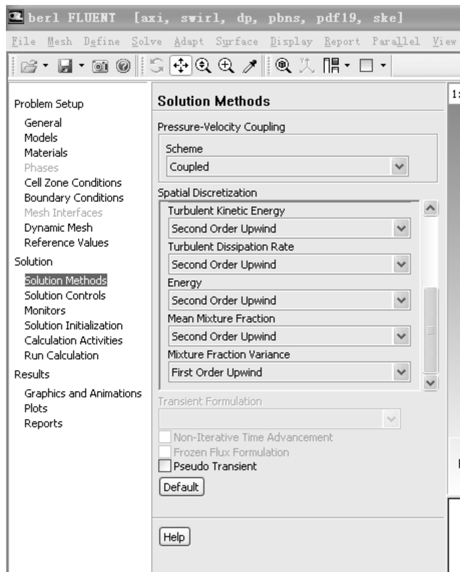


图 5-43　修改模型求解设置

4）选择树形菜单中的[Solution]>[Solution Controls]项，如图 5-44 所示。

5）修改 Solution Controls 设置如图 5-45 所示，在“Explicit Relaxation Factors”栏中将“Momentum”项设置为 0.3，将“Pressure”项设置为 0.5。在“Under-Relaxation Factors”栏中将“Density”项设置为 0.25，将“Turbulent Kinetic Energy”项设置为 0.7，将“Turbulent Dissipation Rate”项设置为 0.7，其余设置保持不变。

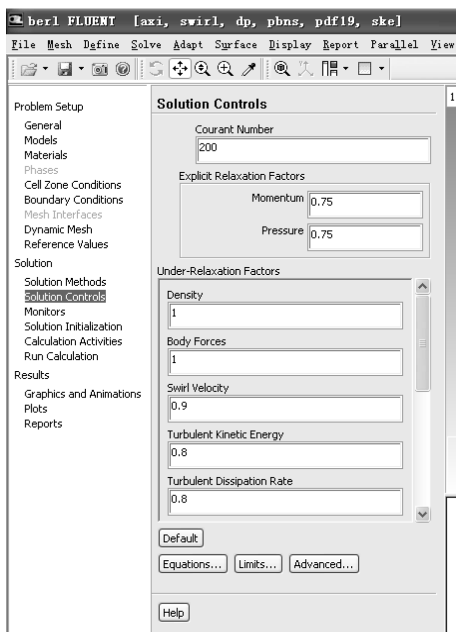


图 5-44　Solution Controls 设置

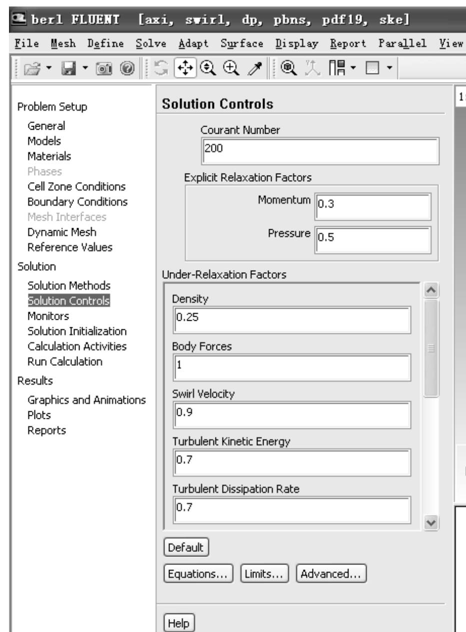


图 5-45　修改 Solution Controls 设置

6）选择树形菜单中的[Solution]>[Monitors]>[Edit...]项，在弹出的“Residual Monitors”对话框中勾选“Plot”项，如图 5-46 所示。单击“OK”按钮退出。

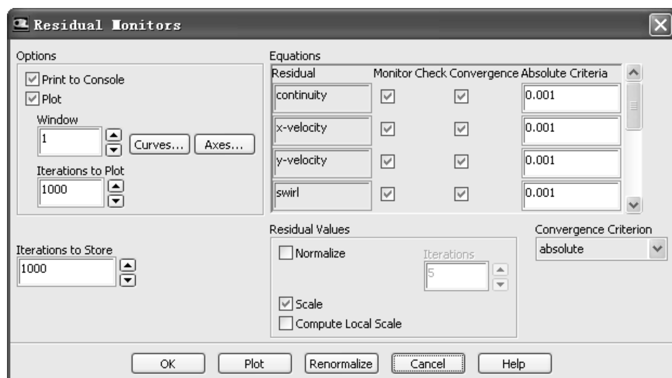


图 5-46　勾选“Plot”项

7）选择树形菜单中的[Solution]>[Solution Initialization]项，在“Initialization Methods”栏中选择“Hybrid Initialization”项，如图 5-47 所示。单击“Initialize”按钮进行初始化。

8）选择[File]>[Write]>[Case…]菜单命令，保存本算例，如图 5-48 所示。

9）输入文件名“berl.cas”，单击“OK”按钮保存文件，如图 5-49 所示。



图 5-47 初始化

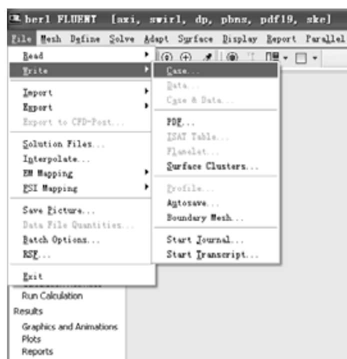


图 5-48 保存本算例

10）选择树形菜单中的[Solution]>[Run Calculation]项，将“Number of Iterations”项设置为“1500”，如图 5-50 所示。

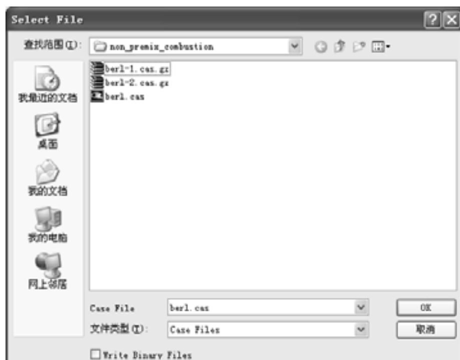


图 5-49 输入文件名“berl.cas”

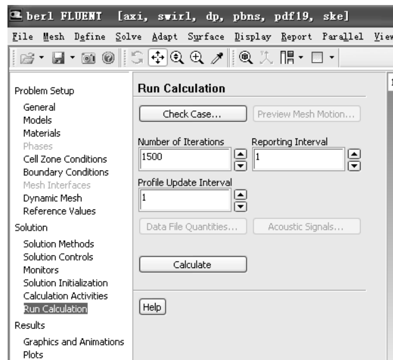


图 5-50 设置迭代步数

11）单击“Calculate”按钮，进行计算。计算过程中的收敛曲线如图 5-51 所示。

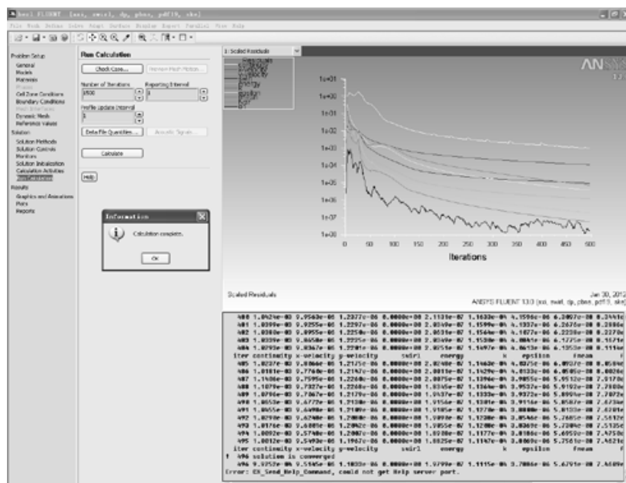


图 5-51 计算过程中的收敛曲线

12）计算完成后，选择[File]>[Write]>[Data…]菜单命令，输入文件名“berl.dat”，保存本算例的结果文件。

5.4　计算结果后处理

1）选择树形菜单中的[Results]>[Graphics and Animations]>[Contours]>[Set Up...]项，弹出“Contours”对话框，勾选“Options”栏中的“Filled”项，在“Contours of”栏中选择“Temperature...”和“Static Temperature”项。

2）单击“Display”按钮，视图区中的温度云图如图 5-52 所示。

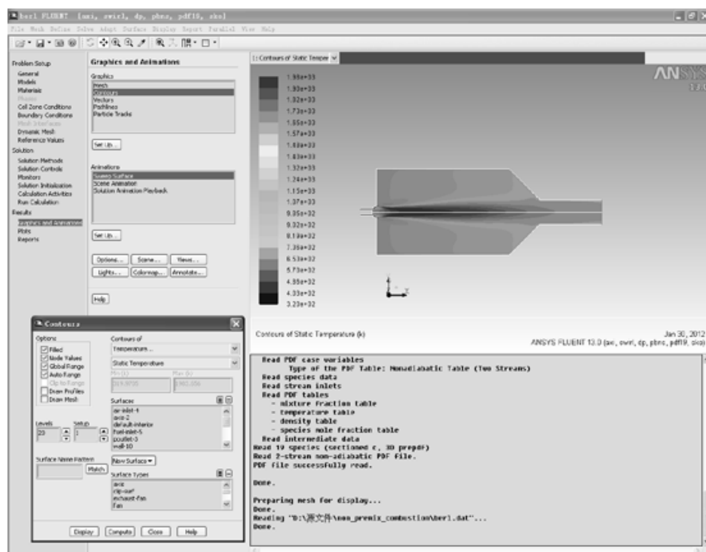


图 5-52　视图区中的温度云图

3）选择“Contours of”栏中的“Velocity...”和“Velocity Magnitude”项，单击“Display”按钮，视图区中的速度云图如图 5-53 所示。

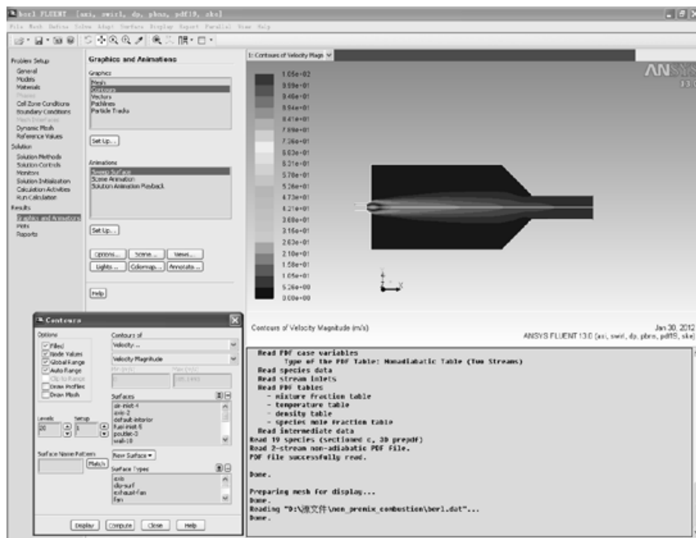


图 5-53　视图区中的速度云图

4）再次选择“Contours of”栏中的“Species…”和“Mass fraction of o2”项，单击“Display”按钮，视图区中的O_2质量分数云图如图 5-54 所示。

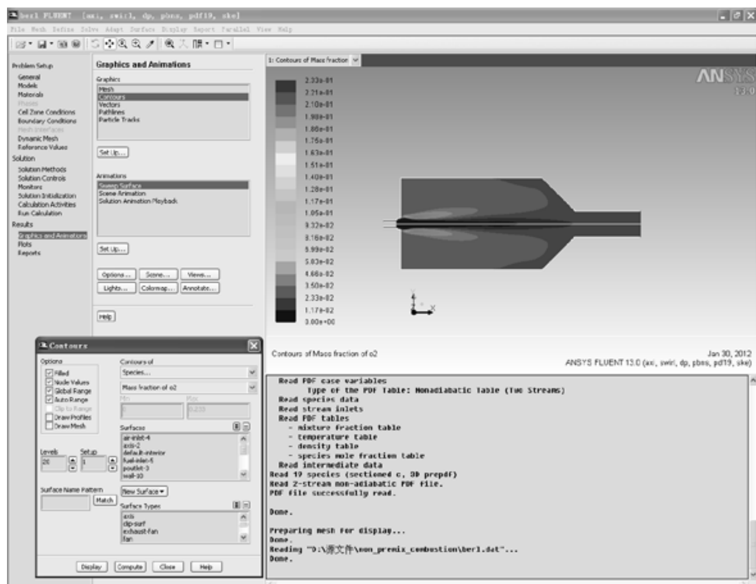


图 5-54　视图区中的O_2质量分数云图

5）选择树形菜单中的[Results]>[Reports]>[Fluxes]>[Set Up...]项，弹出“Flux Reports”对话框。保持选择“Options”栏中的“Mass Flow Rate”项，选择“Boundaries”栏中的“air-inlet-4”、“fuel-inlet-5”和“poutlet-3”3 项。单击“Compute”按钮，“Results”栏和右下侧的输出栏均显示出对应边界的质量流量，如图 5-55 所示。

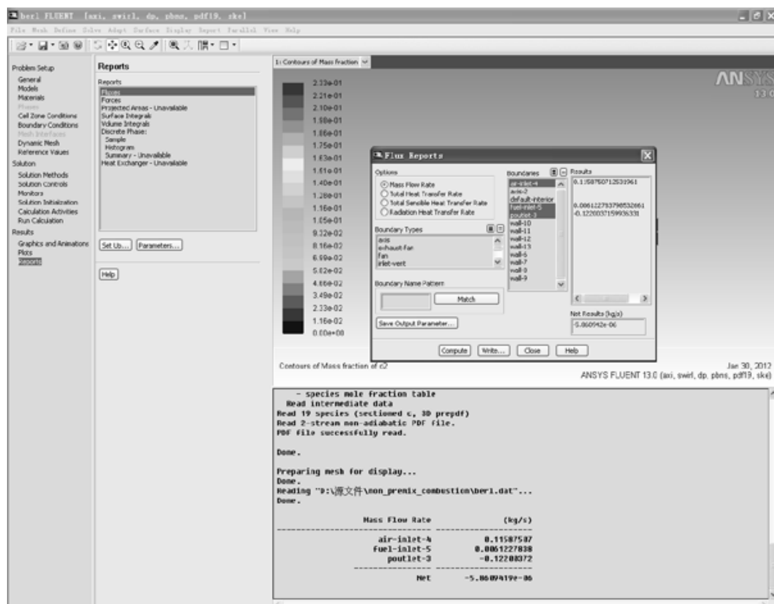


图 5-55　质量流量

6）选择树形菜单中的[Results]>[Reports]>[Surface Integrals]>[Set Up...]项，弹出“Surface Integrals”对话框。选择“Report Type”栏中的“Mass-Weighted Average”项，选择“Field Variable”栏中的“Temperature...”和“Static Temperature”项，选择“Surfaces”栏中的“poutlet-3”项。单击“Compute”按钮，“Mass-Weighted Average(K)”栏显示出对应表面的平均温度，如图 5-56 所示。

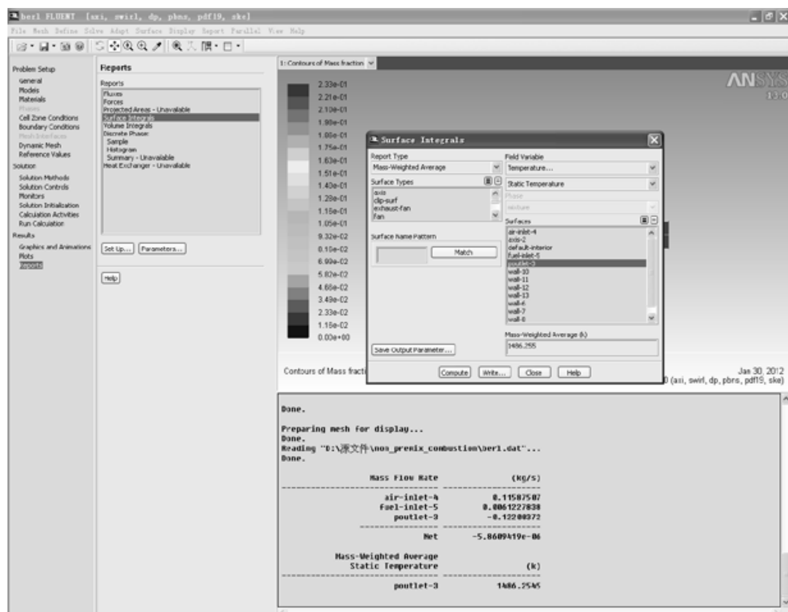


图 5-56　平均温度

第 6 章　CFX 软件与流体力学性能分析

本章主要内容：

本章主要介绍 CFX 软件的基本功能，以及与流体力学性能分析相关的前处理软件、计算求解设置、求解技巧、后处理以及报告生成等功能。

本章学习目标：

✧ ANSYS−BladeGen 风机建模流程及技巧。

✧ ANSYS−Turbogrid 网格划分流程及技巧。

✧ CFX 软件流体力学性能分析流程及技巧。

6.1　ANSYS−BladeGen 功能简介及风机建模实例

6.1.1　BladeGen 功能简介

轴流风机的造型在 ANSYS-BladeGen 中进行。ANSYS-BladeGen 是专业的叶轮机械造型软件之一，其工作区有 A、B、C、D 4 个窗口，如图 6−1 所示。A 窗口为风机子午面视图，可以通过修改各顶点的坐标值修改风机子午面形状。B 窗口为各截面翼型视图，可通过修改 C、D 两个窗口实现满足气动性能需要的翼型。C 窗口为各截面翼型沿流向的气流角分布，D 窗口为各截面翼型的厚度分布。

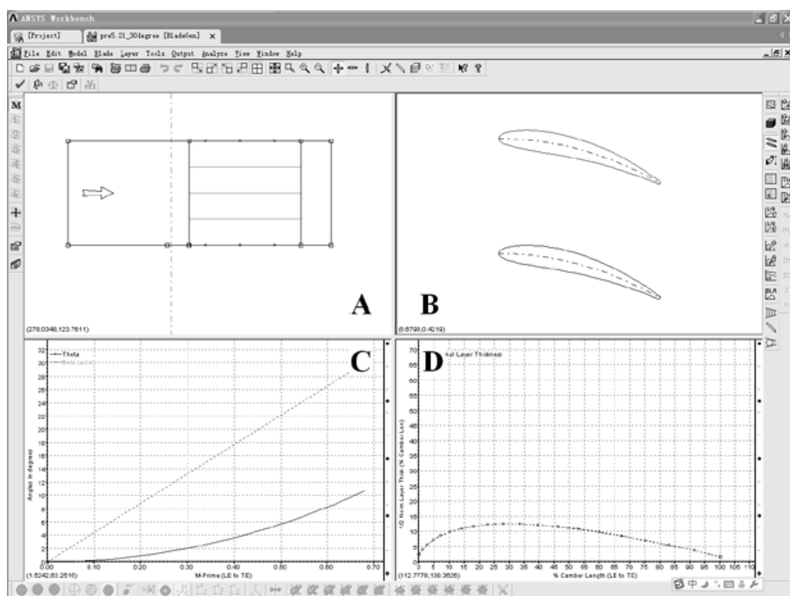


图 6−1　BladeGen 软件的工作区

6.1.2 BladeGen 风机建模实例

1）双击左侧菜单栏中的 BladeGen 图标，右侧视图区中出现 BladeGen 模块，如图 6-2 所示。可以看到，该模块顶部编号为 A，同时“2 Blade Design”列右侧为一个问号，指软件还未进入编辑状态。

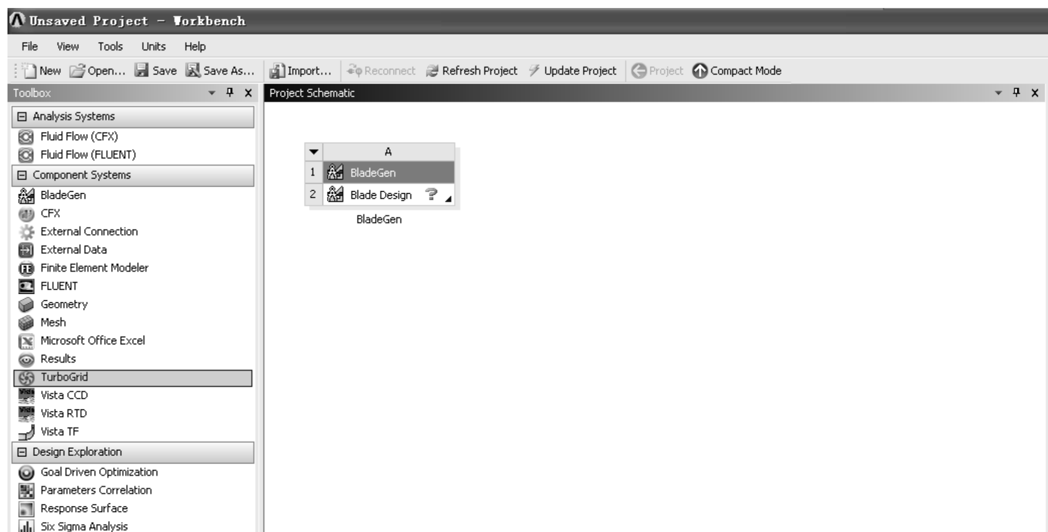


图 6-2　BladeGen 模块

2）按住鼠标左键，将左侧菜单栏中的 TurboGrid 图标拖动至右侧视图区中的 BladeGen 模块上，如图 6-3 所示。

3）将鼠标置于“2 Blade Design”上，该图标以红色边框显示，同时右侧出现一个红色矩形框。

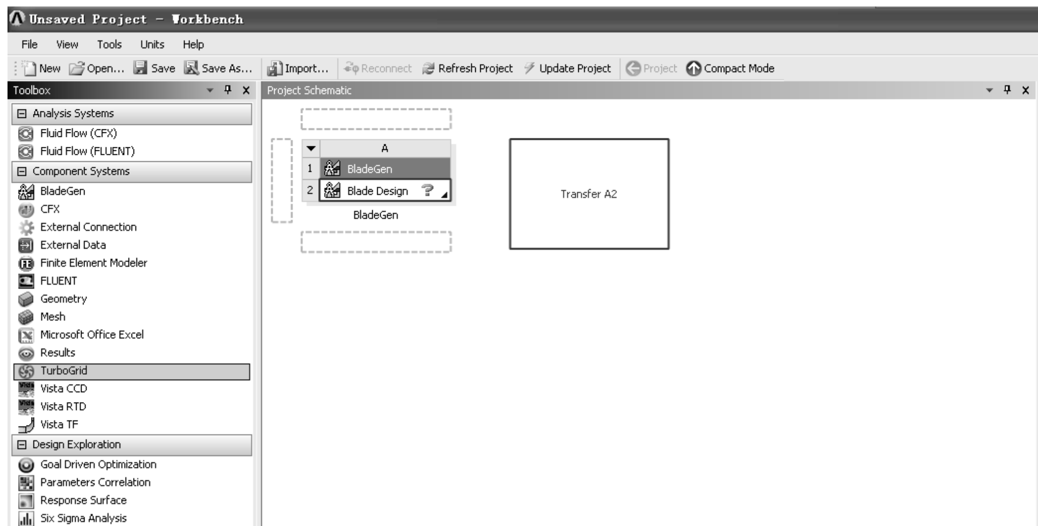


图 6-3　添加 TurboGrid 模块

4）松开鼠标左键，视图区出现 TurboGrid 模块，编号为 B，同时出现一个连接 BladeGen 模块与 TurboGrid 模块的单向箭头，如图 6-4 所示。该操作可在 BladeGen 模块操作完成后，将风机结构数据直接导入 TurboGrid 软件。

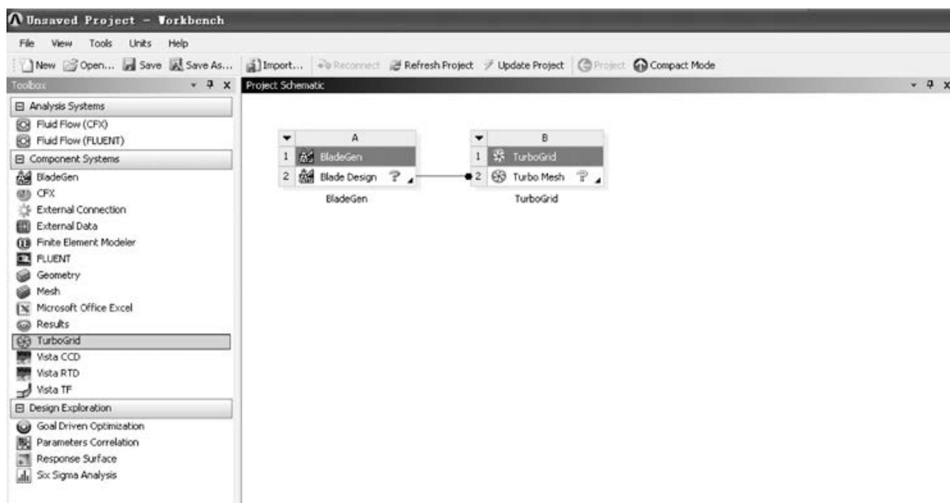


图 6-4　连接 BladeGen 模块与 TurboGrid 模块

5）双击 BladeGen 模块中的图标“2 Blade Design”，打开 BladeGen 软件主界面，如图 6-5 所示。



图 6-5　打开 BladeGen 软件主界面

6）单击工具栏中的🗋按钮，出现空白视图区和“Initial Meridional Configuration Dialog”对话框，如图 6-6 所示。

7）将对话框中的 tab 页“Simple Axial”切换到“Normal Axial”下，如图 6-7 所示。

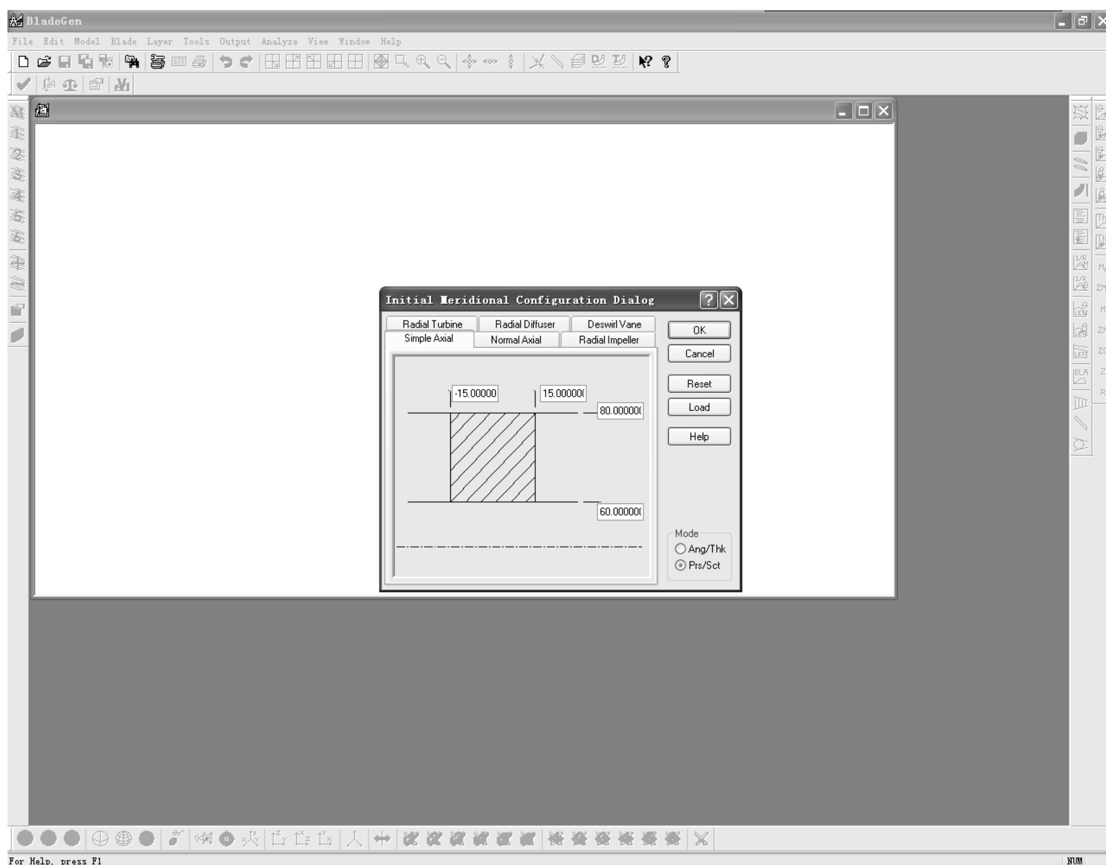


图 6-6 “Initial Meridional Configuration Dialog”对话框

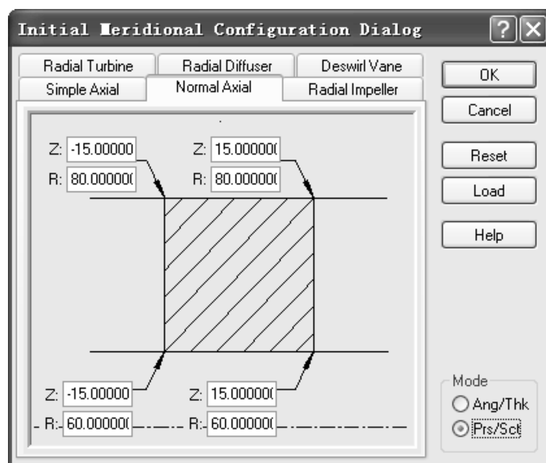


图 6-7 Normal Axial

8）将表示叶轮流道长度和轮毂比的 4 组 Z-R 坐标值修改为图 6-8 中的数值，同时将右下角的叶片模式更改为“Ang/Thk”模式。

9）单击“OK”按钮，打开“Initial Angle/Thickness Dialog”对话框，如图 6-9 所示。

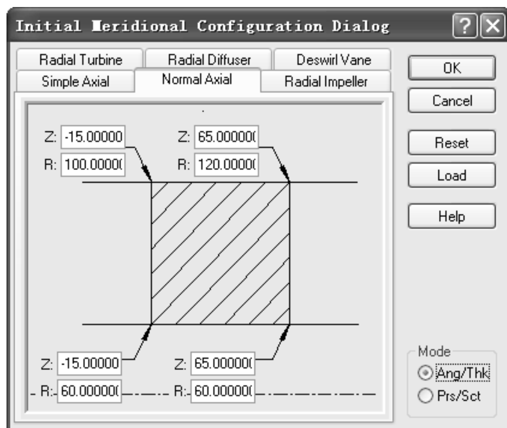


图 6-8 修改 Z-R 坐标值

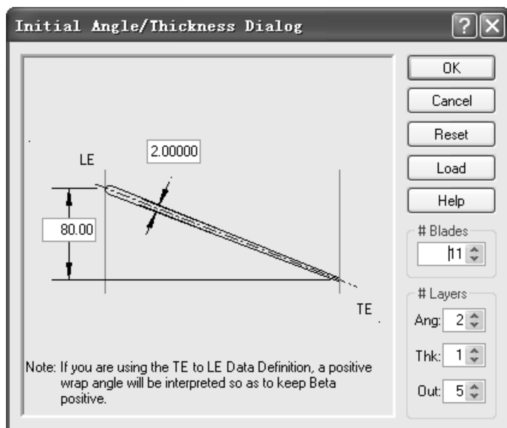


图 6-9 修改叶片与旋转轴的角度

10）将左侧的数值“80.00”更改为“15.00”（该数值对应叶片与旋转轴的角度，即气流在叶片流道中流向的改变程度），将叶片数目“#Blades”项更改为 13，“#Layers”栏的“Ang”项改为 5，叶片厚度改为 3，其余设置保持不变，如图 6-10 所示。这里，“Ang”项设置为 5，是指沿叶高可分 5 个面编辑进出口角，叶片厚度设置为 3，即 3 mm。

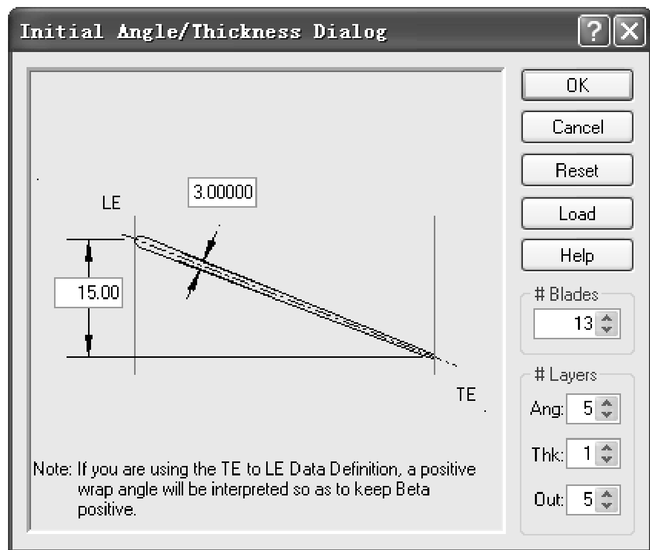


图 6-10 修改叶片参数

11）单击“OK”按钮，视图区出现新建叶轮的 4 种视图方式，如图 6-11 所示。

在子午面视图上可以看到气流流动方向，同时也可通过拖拽或改变坐标值等方式改变进出口区域的宽度。

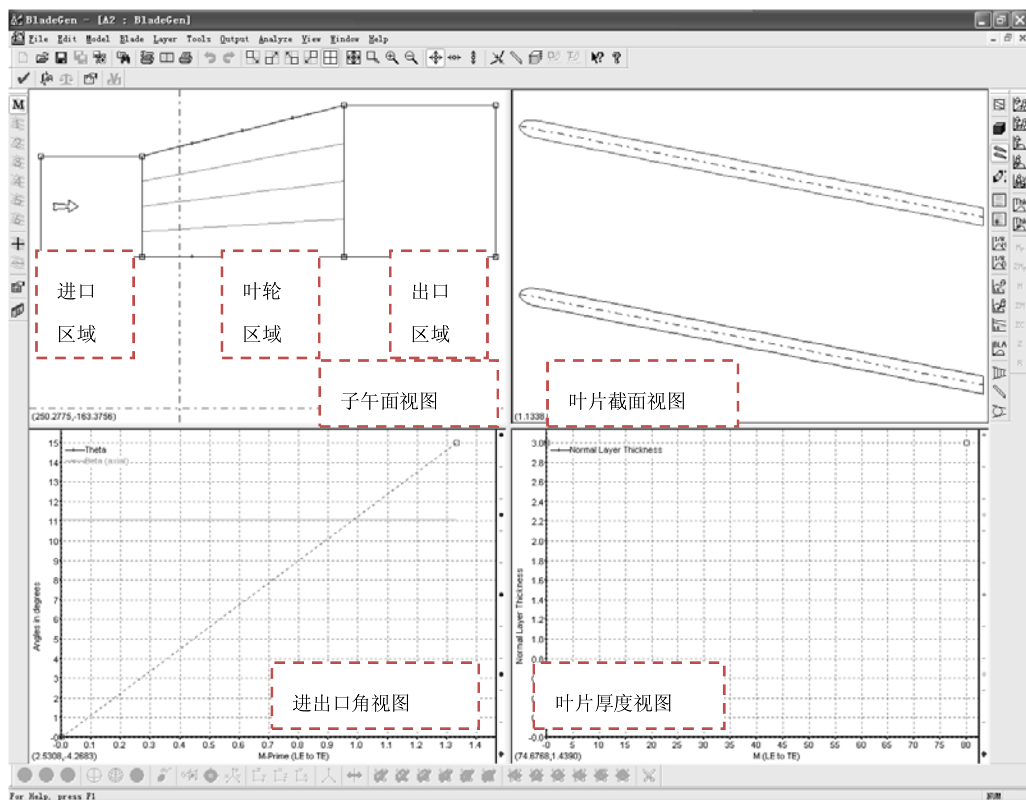


图 6-11　新建叶轮的 4 种视图方式

12）如图 6-12 所示，单击［Model］>［Properties...］菜单命令，编辑风机属性。

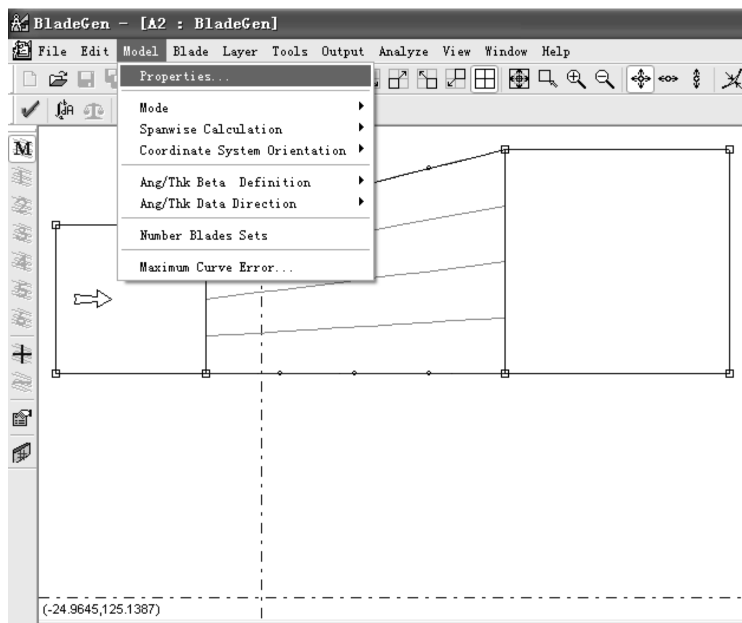


图 6-12　编辑风机属性

13）打开“Model Property Dialog”对话框，如图 6-13 所示。

14）将“Component Type”项更改为“Fan”，将“Model Units”项更改为“MM”，如图 6-14 所示。单击“OK”按钮确认操作。

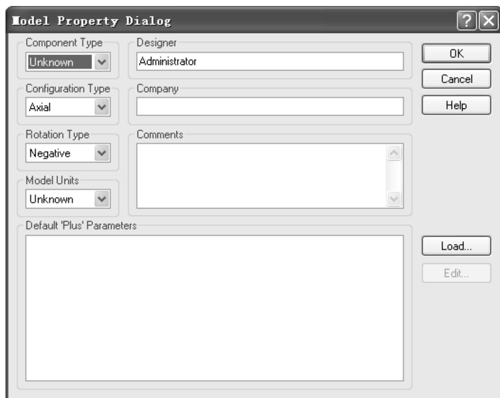


图 6-13 “Model Property Dialog”对话框

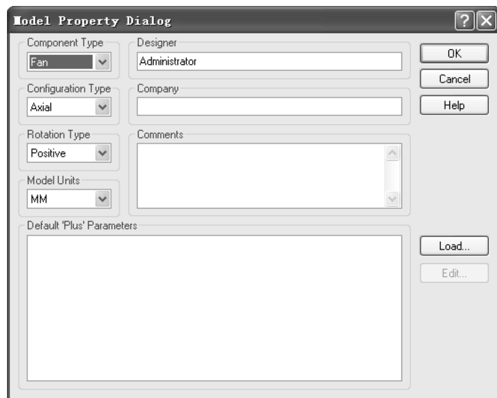


图 6-14 修改风机型式

15）单击［Blade］>［Properties...］菜单命令，如图 6-15 所示。

16）打开“Blade Property Dialog”对话框，修改叶片属性，如图 6-16 所示。

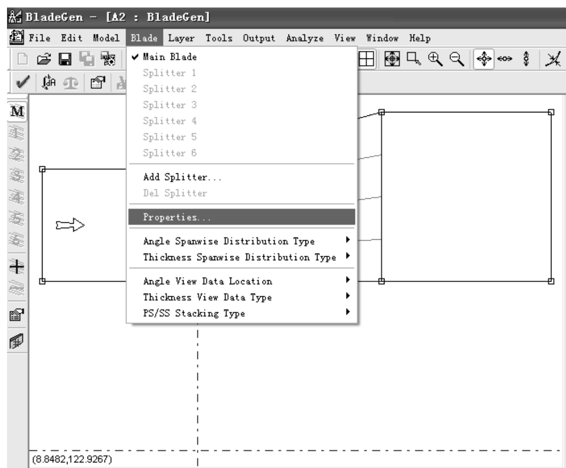


图 6-15 修改叶片属性

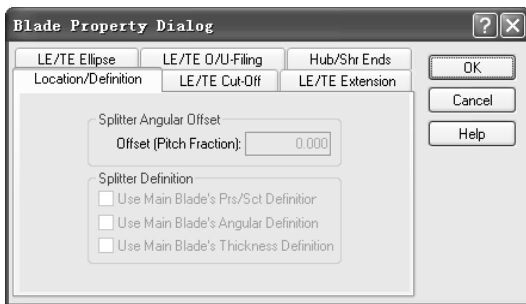


图 6-16 “Blade Property Dialog”对话框

17）选择 “LE/TE Ellipse”页，如图 6-17 所示。

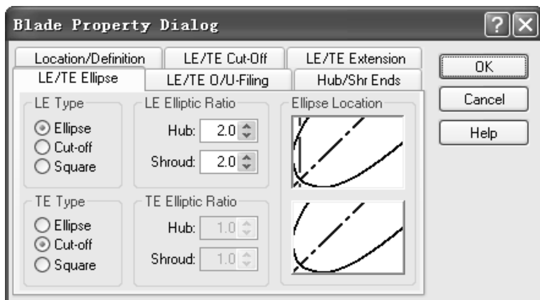


图 6-17 选择“LE/TE Ellipse”页

18）将“TE Type”项更改为“Ellipse”方式，如图 6-18 所示。单击“OK”按钮确认操作。

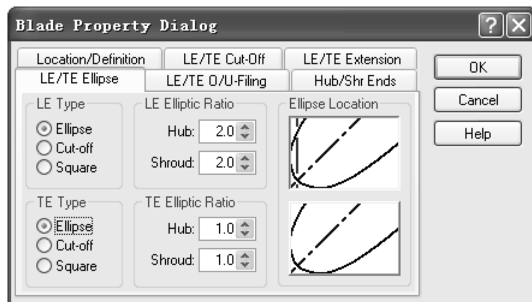


图 6-18　修改 TE Type

19）此时，视图区中的叶片截面视图变为图 6-19 所示的形式，这样更便于工艺加工。

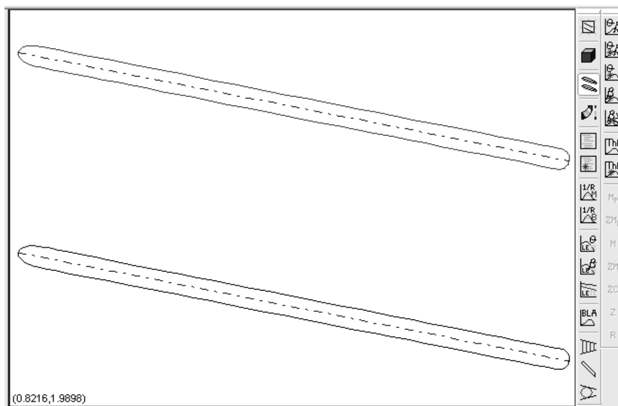


图 6-19　视图区中的叶片截面视图

20）单击右侧工具栏中的按钮，视图区中的叶片截面视图变为图 6-20 所示的单流道视图。

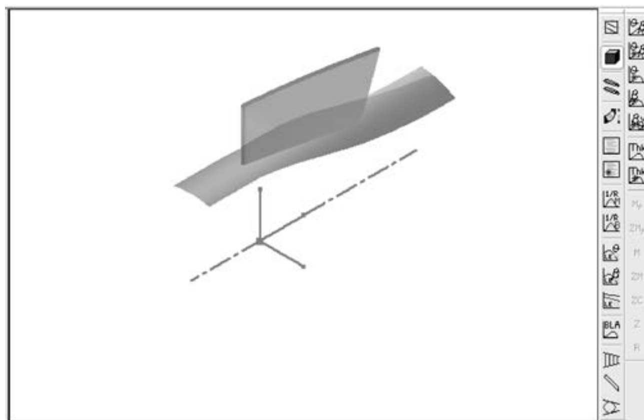


图 6-20　单流道视图

21）将进出口角视图底部左侧工具栏中的 0⊛按钮切换为⊛按钮，视图区中的单流道视图变为图 6-21 所示的整机视图。

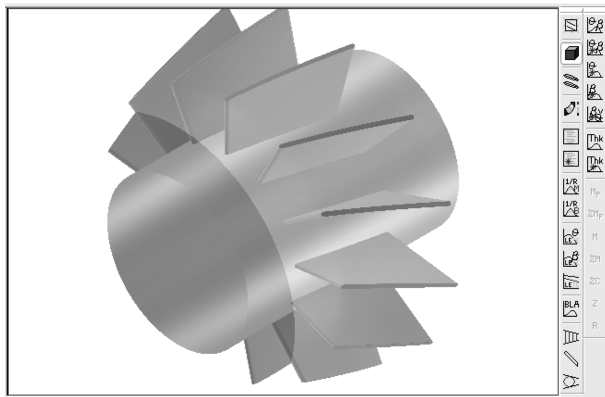


图 6-21　整机视图

22）保存轴流风机模型，如图 6-22 所示。单击［File］>［Save］菜单命令，打开“另存为”对话框。输入文件名为“axialfan”，如图 6-23 所示。单击“保存”按钮确认操作。注意，只能用英文或数字保存在英文或数字的目录下。

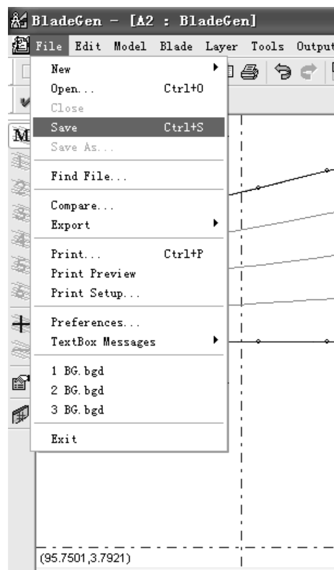


图 6-22　保存轴流风机模型

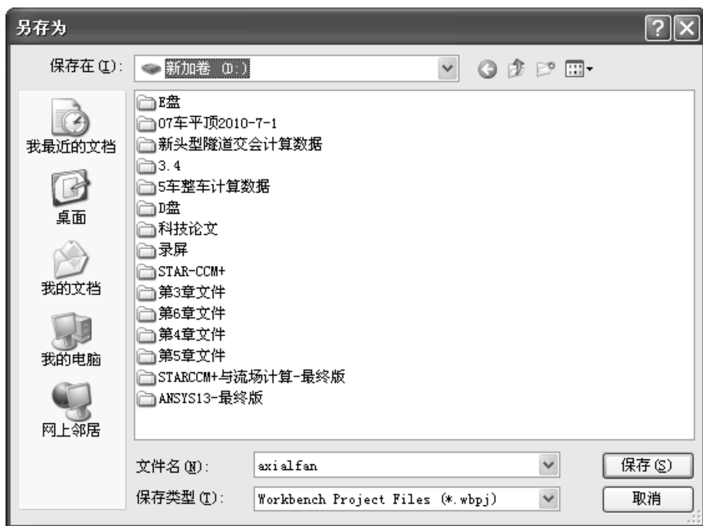


图 6-23　输入文件名

23）查看保存文件，如图 6-24 所示，包括“axialfan.wbpj”和文件夹“axialfan_files”。



图 6-24　查看保存文件

24）此时，Workbench 工作区中 BladeGen 模块上的“2 Blade Design”项的问号变为

√，表示风机建模已完成，而 TurboGrid 模块上的“2 Turbo Mesh”项的问号变为 ，处于待编辑状态，如图 6−25 所示。

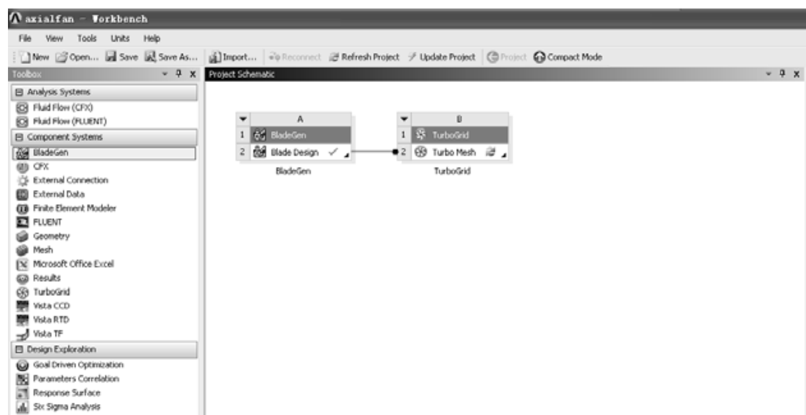


图 6−25　Workbench 工作区的状态变化

6.2　ANSYS−Turbo grid 功能简介及风机网格划分实例

1）双击 Turbo Grid 模块上的“2 Turbo Mesh”项，打开 Turbo Grid 软件，以及轴流风机的单流道模型，如图 6−26 所示。

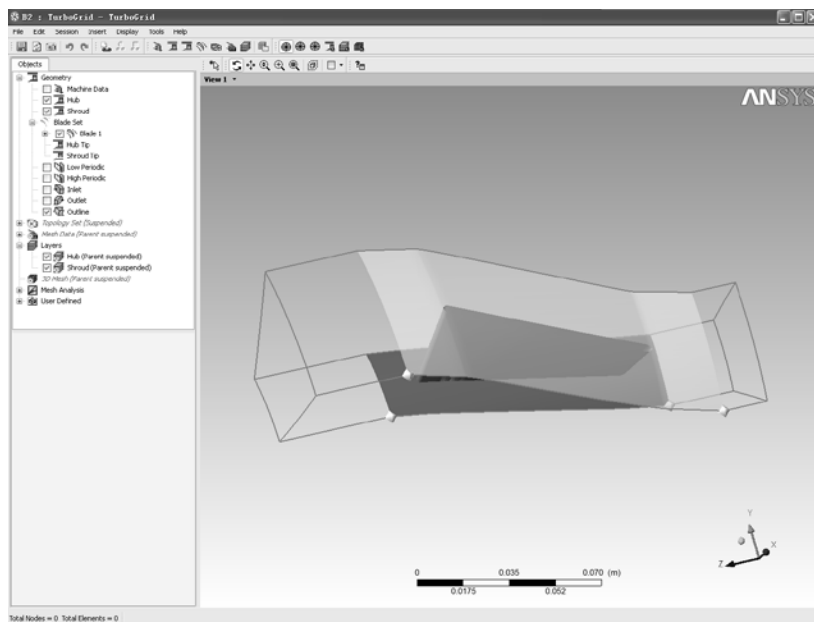


图 6−26　打开 Turbo Grid 软件

2）设置叶顶间隙。如图 6−27 所示，双击树形菜单中的［Geometry］>［Blade Set］>［Shroud Tip］项，其属性栏中的“Tip Option”项为“None”。

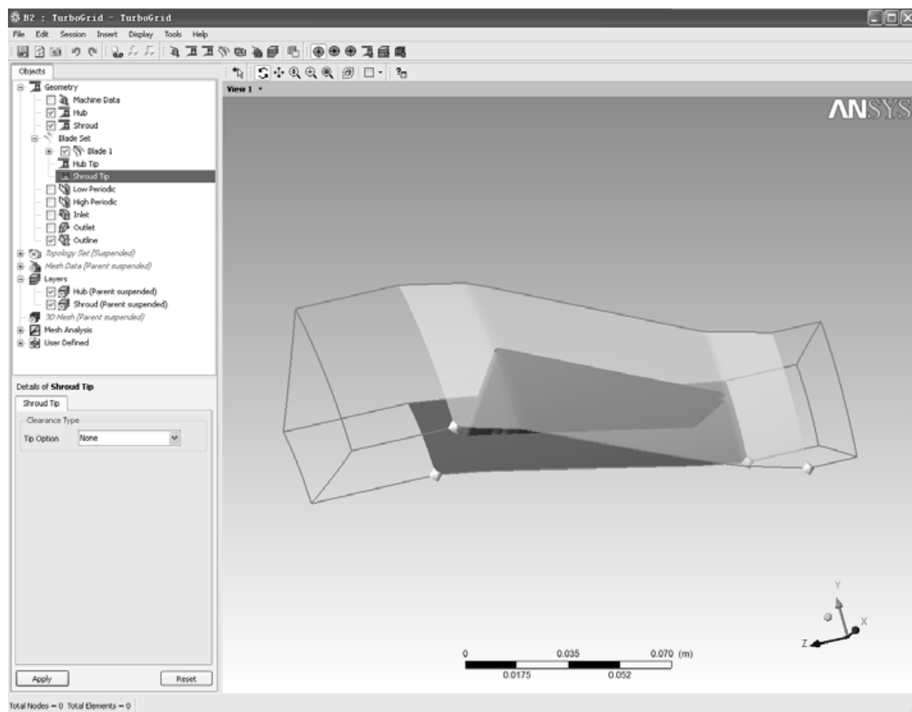


图 6−27 设置叶顶间隙

3）将“Tip Option”项由“None”更改为“Constant Span”，如图 6−28 所示。此时，属性栏扩展为图 6−29 所示的形式，保持“Span”项值为 0.95，单击“Apply”按钮，生成叶顶间隙。

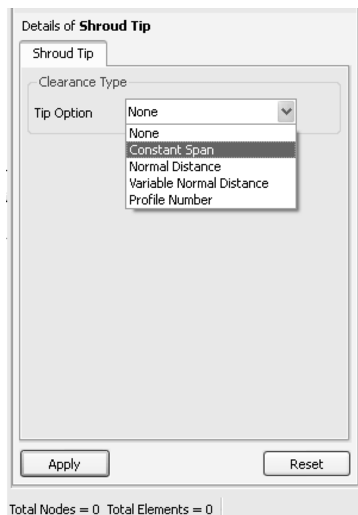


图 6−28 选择 Constant Span 方式

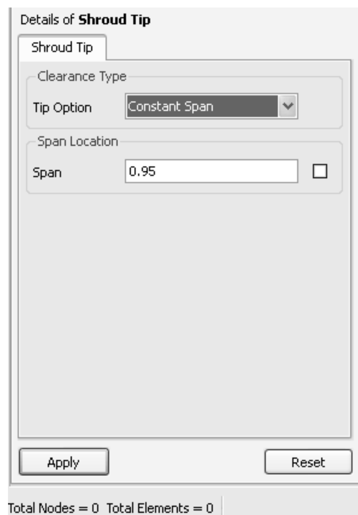


图 6−29 选择叶顶高度

4）右键单击树形菜单中的“Topology Set（Suspended）”，取消选择“Suspend Object Updates”项，如图 6-30 所示。

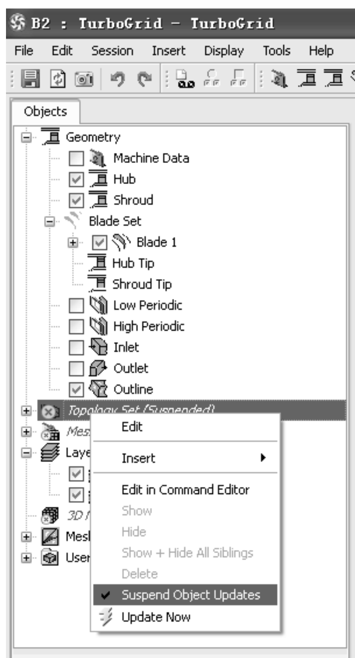


图 6-30　取消选择“Suspend Object Updates”项

5）经过一段时间，软件完成叶轮流道网格拓扑结构的划分，如图 6-31 所示。同时，树形菜单中的“Topology Set（Suspended）”变换为“Topology Set”。

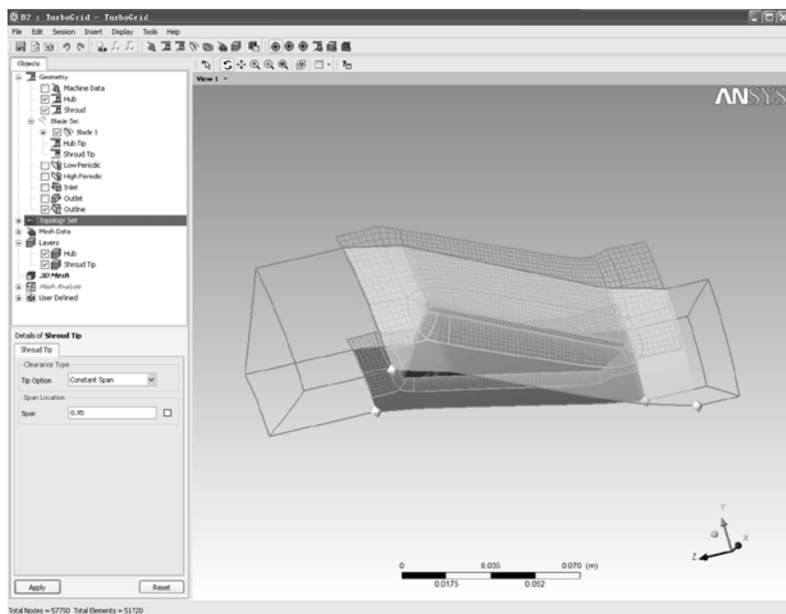


图 6-31　拓扑结构的划分

6）双击树形菜单中的“Topology Set”项，属性栏如图 6−32 所示。由图 6−33 中的“Placement”项可以看出，软件有“ATM Optimized”和“Traditional with Control Point”两种网格拓扑优化方式。

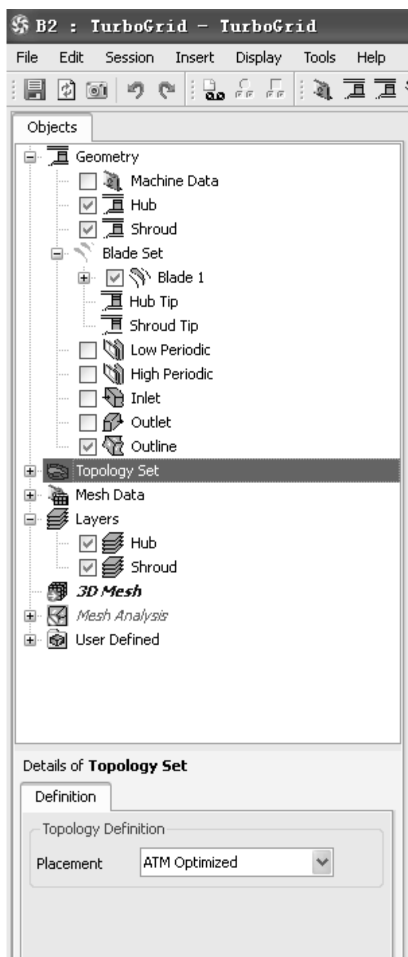


图 6−32　Topology Set 项的属性栏

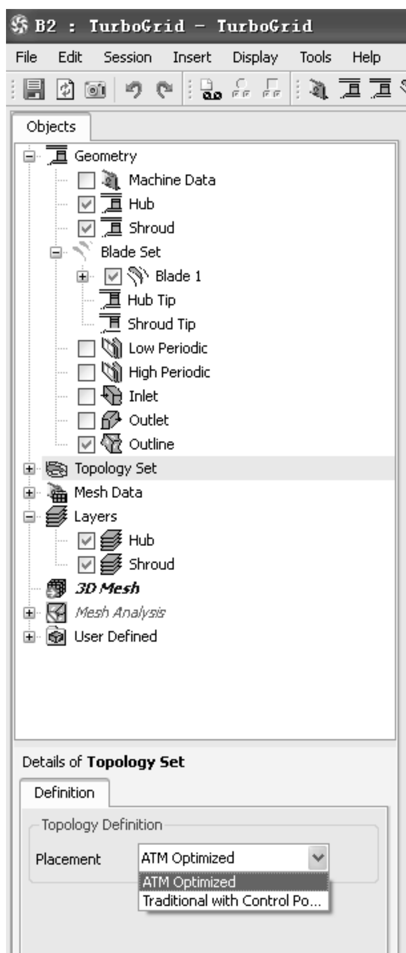


图 6−33　两种网格拓扑优化方式

7）“Traditional with Control Point”方式如图 6−34 所示。其中，“Method”项包含多种网格划分方式，如图 6−35 所示。

本文选择新版本中增加的“ATM Optimized”方式，网格质量更佳。

8）双击树形菜单中的“Mesh Data”项，属性栏如图 6−36 所示。选择“Node Count”项为 250000，保证计算的网格无关性。同时选择“Inlet Domain”和“Outlet Domain”两项，在进出口均划分体网格。

9）单击“Apply”按钮，确认设置。

10）右键单击树形菜单中的 *3D Mesh*，选择“Create Mesh”项，如图 6−37 所示。也可以单击工具栏按钮，进行体网格划分。网格划分结束后，在软件界面左下角可以看到节点总数为 269739，网格总数为 249885。

11）双击树形菜单中的 Mesh Analysis (Error) 项，弹出“Mesh Statistics”对话框，如图 6-38 所示。在 6 项指标中，仅“Maximum Element Volume Ratio”项有很少部分超过最低限定值，但由“Value”列中的数值可知，这项的最大值还算合理，故网格划分基本合理。同时可以双击 Maximum Element Volume Ratio 6.06216 0.6618 查看质量较差的网格情况，并相应地调整提高质量。

单击按钮，操作完成后可退出软件，回到 Workbench 视图环境中。

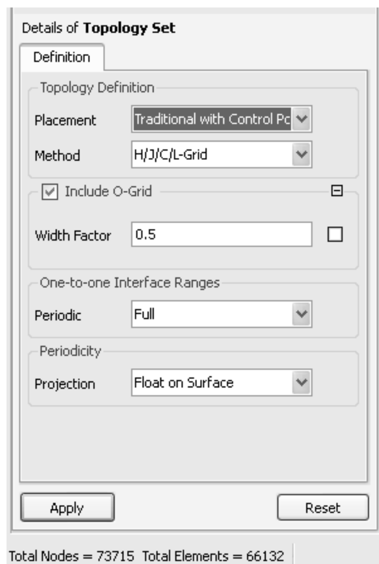


图 6-34 “Traditional with Control Point”方式

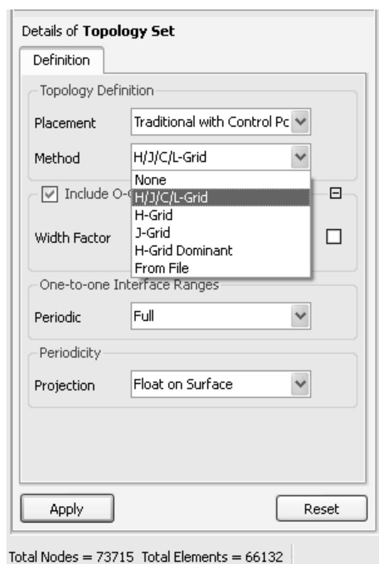


图 6-35 多种网格划分方式

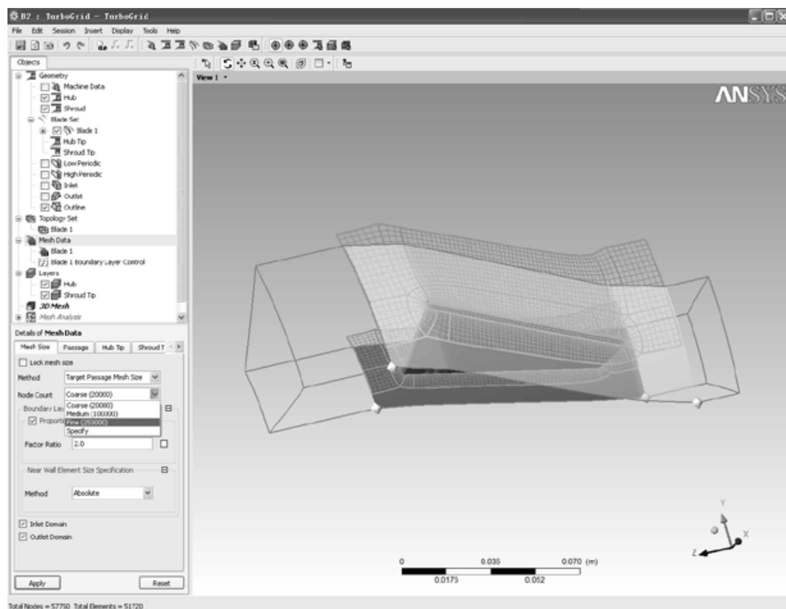


图 6-36 “Mesh Data”项的属性栏

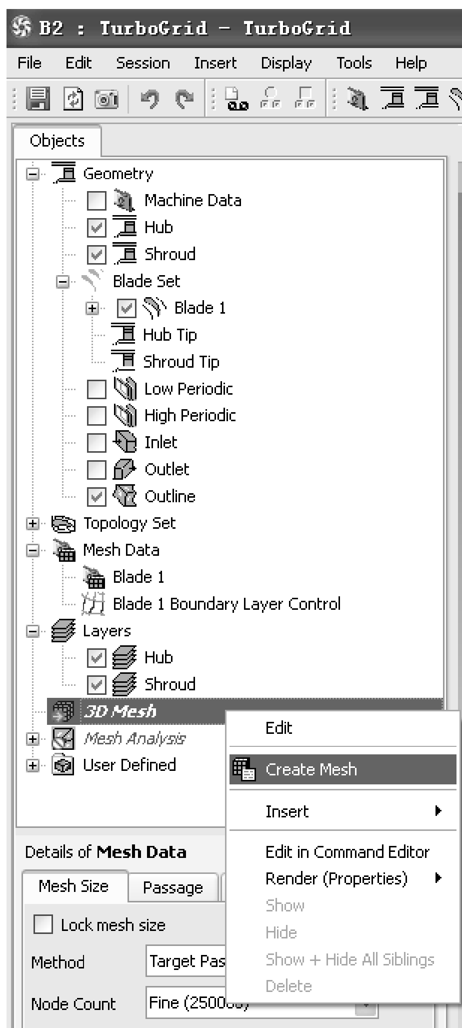
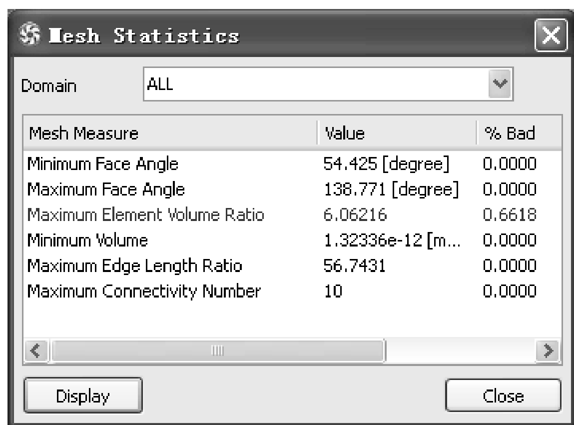


图 6-37 选择“Create Mesh”项



Mesh Measure	Value	% Bad
Minimum Face Angle	54.425 [degree]	0.0000
Maximum Face Angle	138.771 [degree]	0.0000
Maximum Element Volume Ratio	6.06216	0.6618
Minimum Volume	1.32336e-12 [m...	0.0000
Maximum Edge Length Ratio	56.7431	0.0000
Maximum Connectivity Number	10	0.0000

图 6-38 “Mesh Statistics”对话框

6.3 CFX 软件与流体力学性能分析实例

6.3.1 CFX-Pre 求解设置

1）按住鼠标左键，将左侧菜单栏中的 CFX 图标拖动至右侧视图区中 Turbo Grid 模块的“2 Turbo Mesh”上，该图标被加上红色边框显示，同时右侧出现一个红色矩形框，如图 6-39 所示。

2）松开鼠标左键，视图区出现 CFX 模块，编号为 C，同时出现一个连接 Turbo Grid 模块与 CFX 模块的单向箭头，如图 6-40 所示。

该操作可在 Turbo Grid 模块操作完成后，将风机网格数据直接导入 CFX-Setup 模块。如图 6-40 所示，此时 CFX-Setup 符号为 ，即处于待编辑状态，双击之即可打开软件。

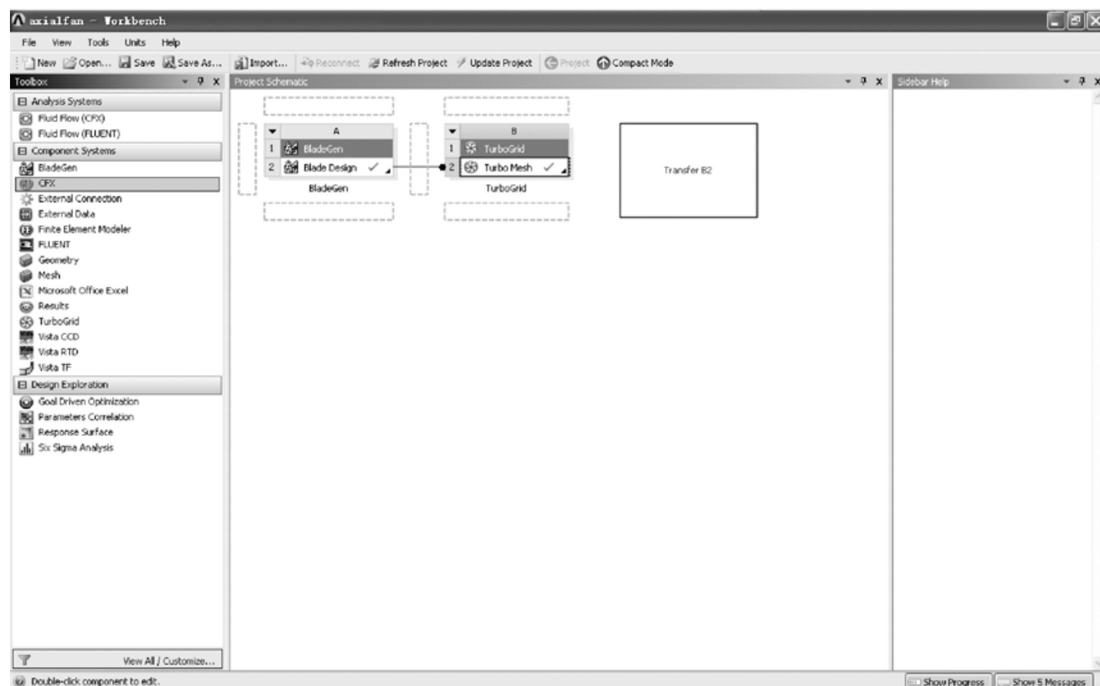


图 6-39　选择 CFX 求解器

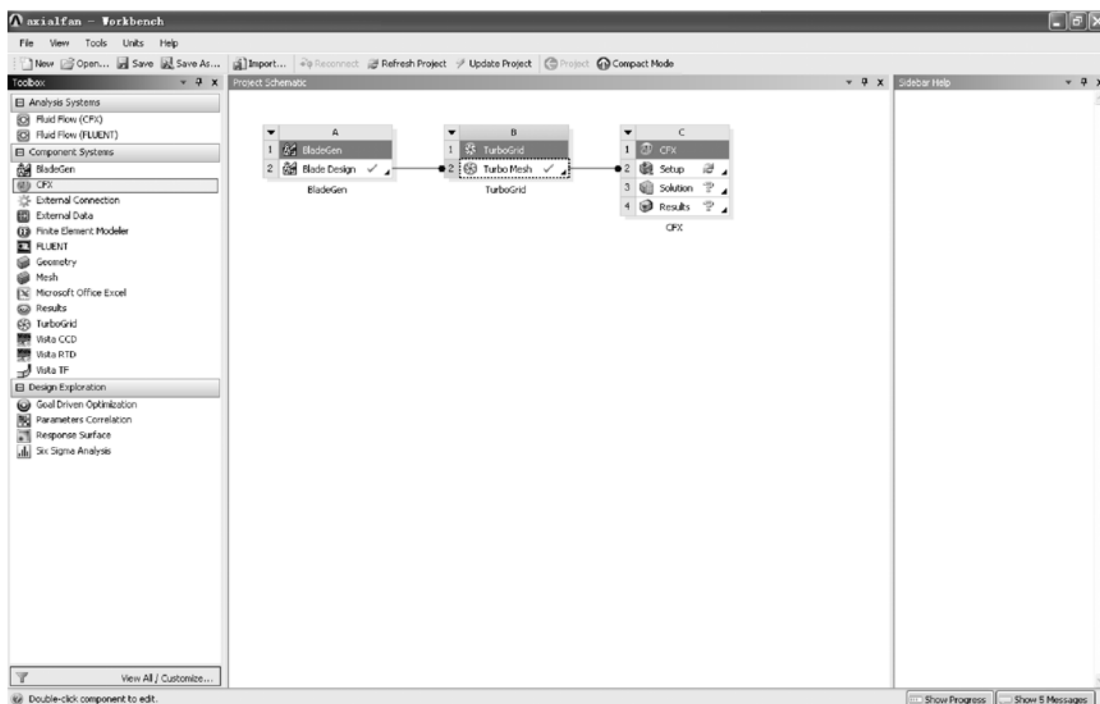


图 6-40　连接 Turbo Grid 模块与 CFX 模块

3）新打开的 Setup 模块即 CFX-Pre 模块，如图 6-41 所示。

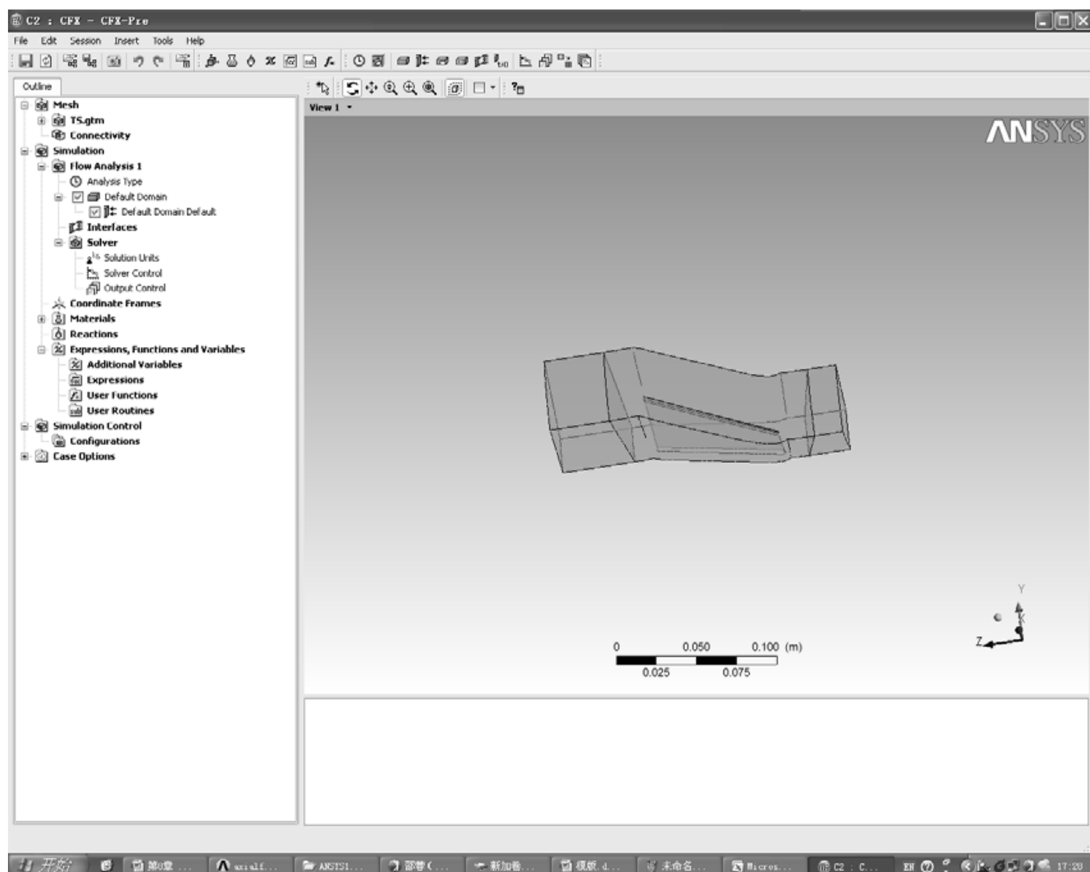


图 6-41　CFX-Pre 模块

4）图 6-41 所示为 CFX 软件的一般模式，本文可直接选择其专有的叶轮机械模式。如图 6-42 所示，选择［Tools］>［Turbo Mode...］菜单命令，打开叶轮机械模式。

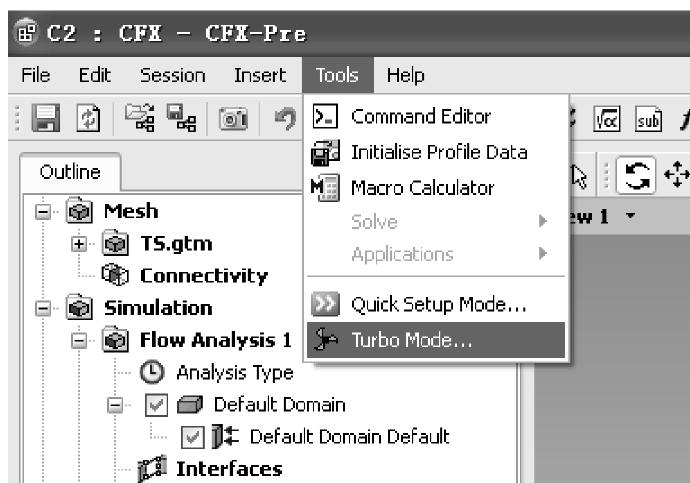


图 6-42　打开叶轮机械模式

5）叶轮机械模式下的软件界面及视图区如图 6−43 所示。

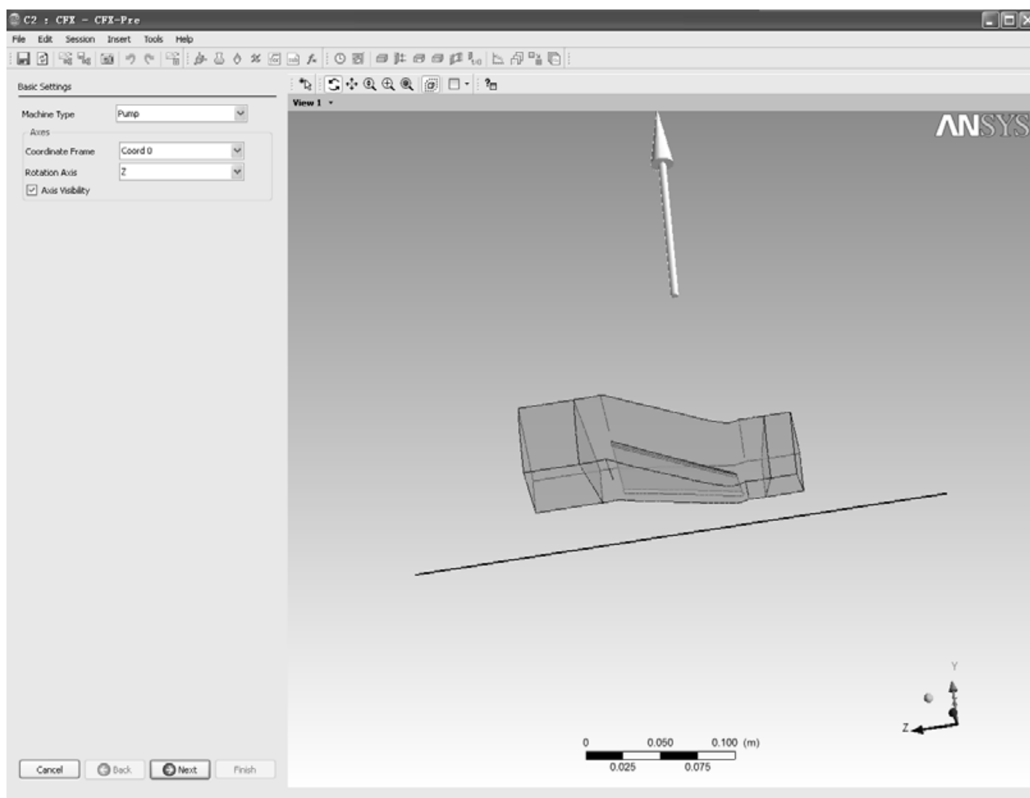


图 6−43　叶轮机械模式下的软件界面及视图区

6）如图 6−44 所示，将“Basic Settings”栏中的“Machine Type”更改为“Fan”。

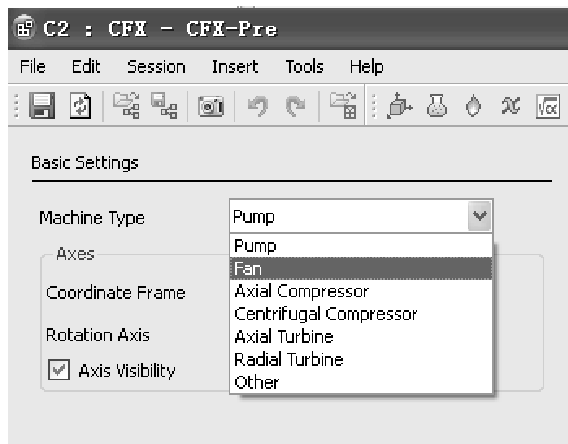


图 6−44　更改 Machine Type

7）单击 Next 按钮，如图 6−45 所示，设置风机转速等参数。

8）单击 R1 按钮，如图 6−46 所示，属性栏中展开风机转速等参数项。

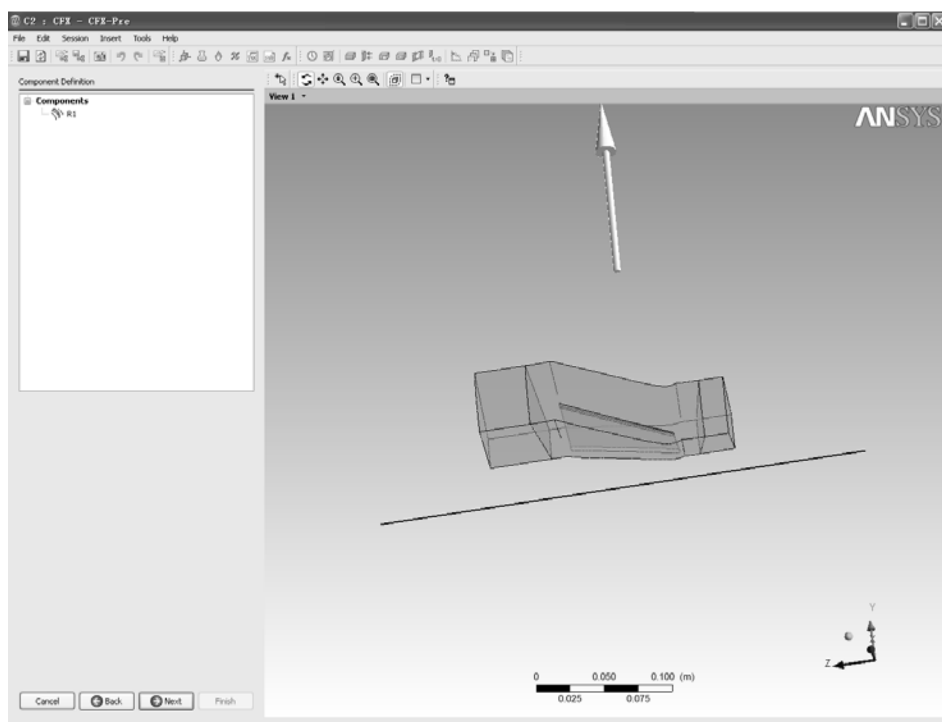


图 6-45　设置风机转速等参数

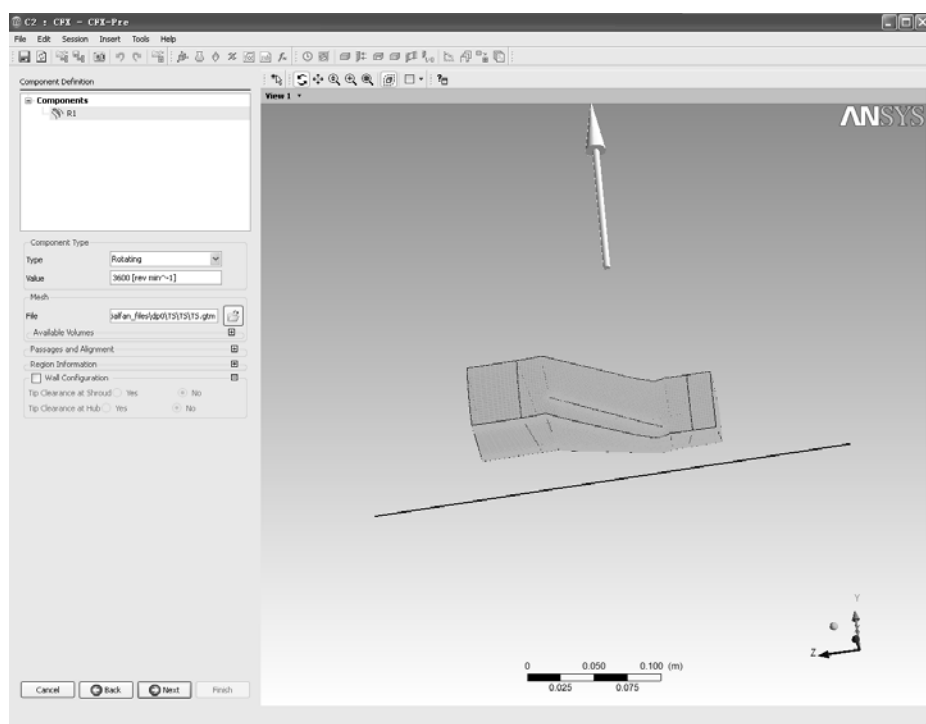


图 6-46　风机转速设置

9）将 Value 项设置为−2000，单位为 rev min^–1（转/分），如图 6−47 所示，风机旋转方向因为转速的设置而改变。

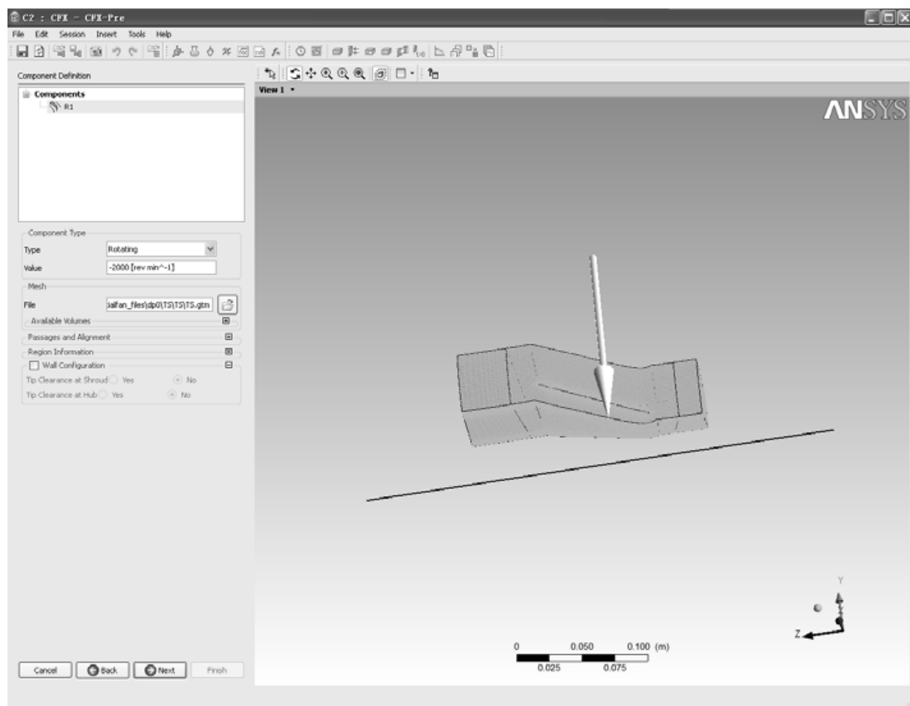


图 6−47　修改风机转速

10）勾选属性栏中的“Wall Configuration”项，在展开的“Tip Clearance at Shroud”项处选择“Yes”，确认叶顶间隙，如图 6−48 所示。

11）单击 Next 按钮，如图 6−49 所示，进行求解方法的设置。本章默认采用 k-Epsilon 方法进行风机性能的稳态计算，气体采用 25℃常温气体。同时将“Inflow/Outflow Boundary Templates”栏选择为第 3 项“P-Total Inlet Mass Flow Outlet”，即选择压力入口、质量流量出口方式，属性栏扩展为如图 6−50 所示的形式。

12）如图 6−51 所示，将 P−Total 项改为 0［Pa］，表示入口处为一个大气压；将 Mass Flow 项改为“Per Passage”方式，表示按单流道出口质量流量方式定义出口条件；将 Mass Flow Rate 项改为 0.1［kg s^–1］。

13）单击 Next 按钮，进入交界面设置界面，如图 6−52 所示。

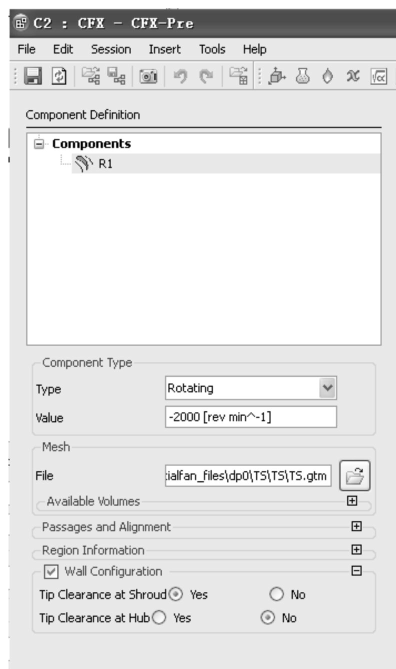


图 6−48　确认叶顶间隙

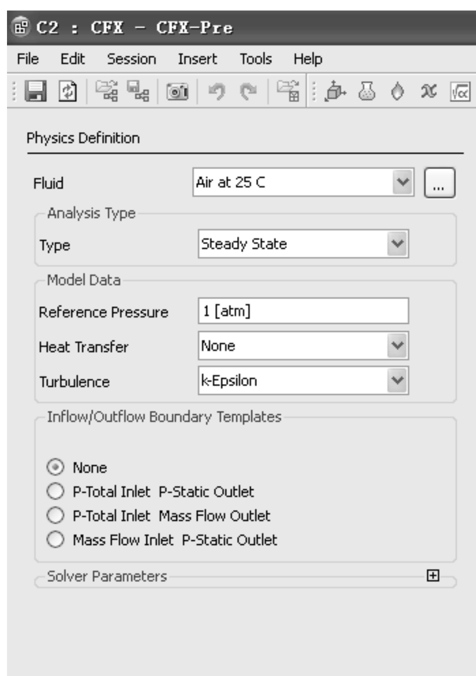


图 6-49 设置求解方法

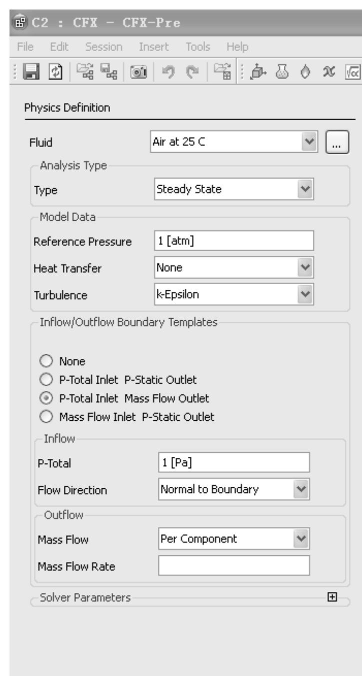


图 6-50 选择压力入口、质量流量出口方式

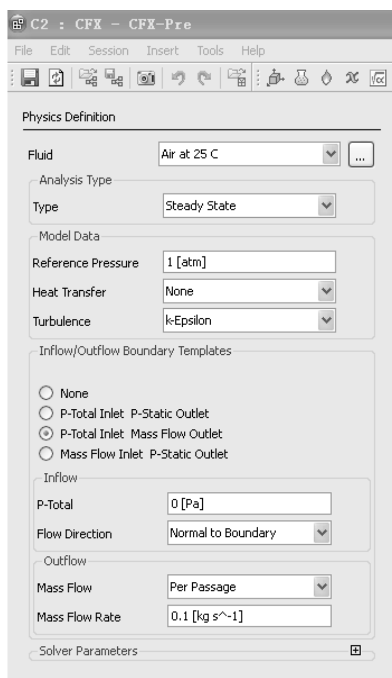


图 6-51 修改进出口条件

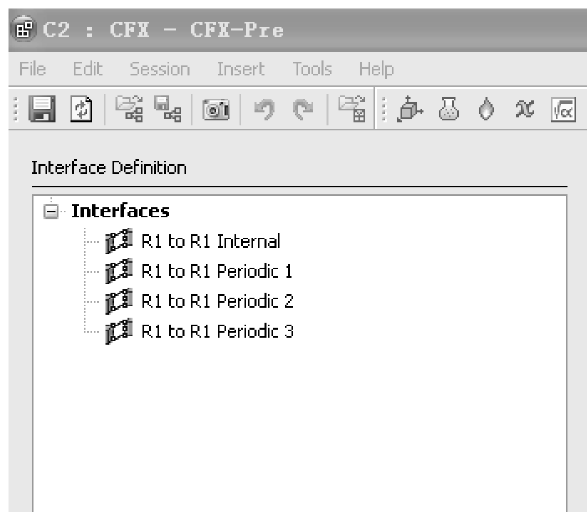


图 6-52 交界面设置界面

14）任意单击 Interfaces 栏中的第 2 项“R1 to R1 Periodic 1”，展开属性栏。如图 6-53 所示，这些周期性条件已经设置好了。

15）继续单击 Next 按钮，进入边界条件设置界面，如图 6-54 所示。

16）单击 Boundaries 栏中的第 3 项“R1 Inlet”，展开属性栏。如图 6-55 所示，入口边界条件已经设置好了。在此，读者不难发现，如果按本章流程一步步建立风机模型并求解计算，将很方便、快捷。

17）继续单击 Next 按钮，进入“Final Operations”界面，如图 6-56 所示。默认选择“Enter General Mode”选项，单击“Finish”按钮，进入软件主界面。

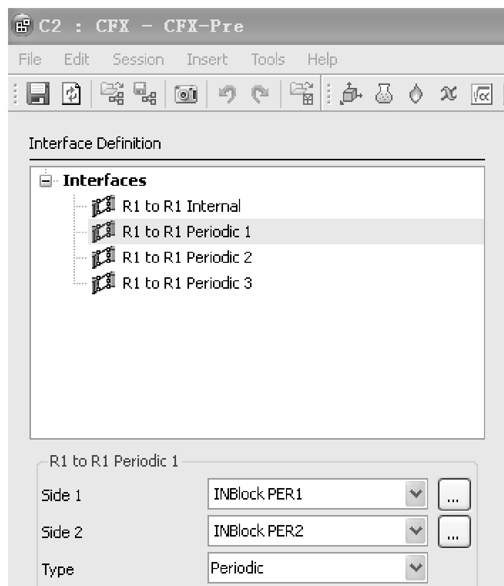


图 6-53　设置周期性条件

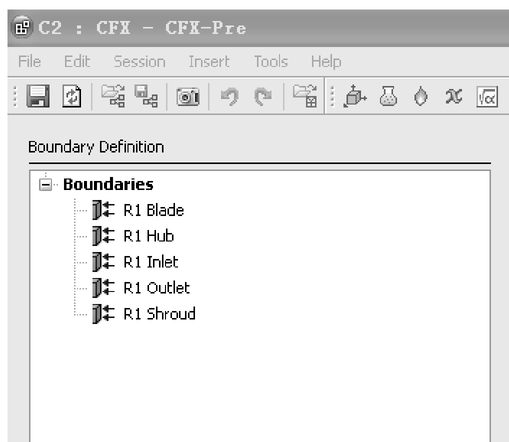


图 6-54　边界条件设置界面

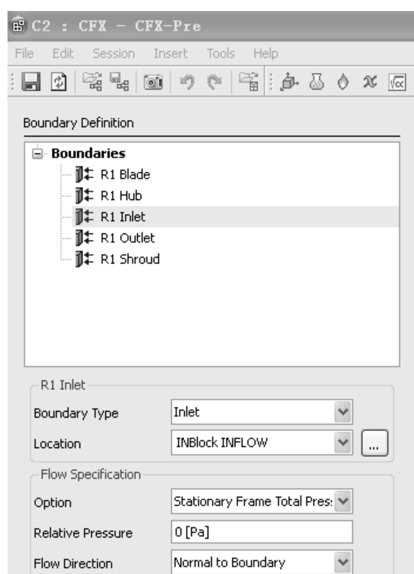


图 6-55　确定边界条件设置

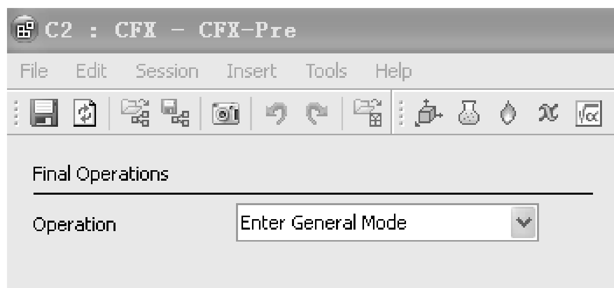


图 6-56　“Final Operations”界面

18）如图 6-57 所示，软件主界面左侧列出了叶轮的一系列边界条件，右侧视图区则对单流道叶轮加载了边界条件。在视图区中，箭头明确表示出了进出口条件，而周期性边界则用循环的箭头表示。

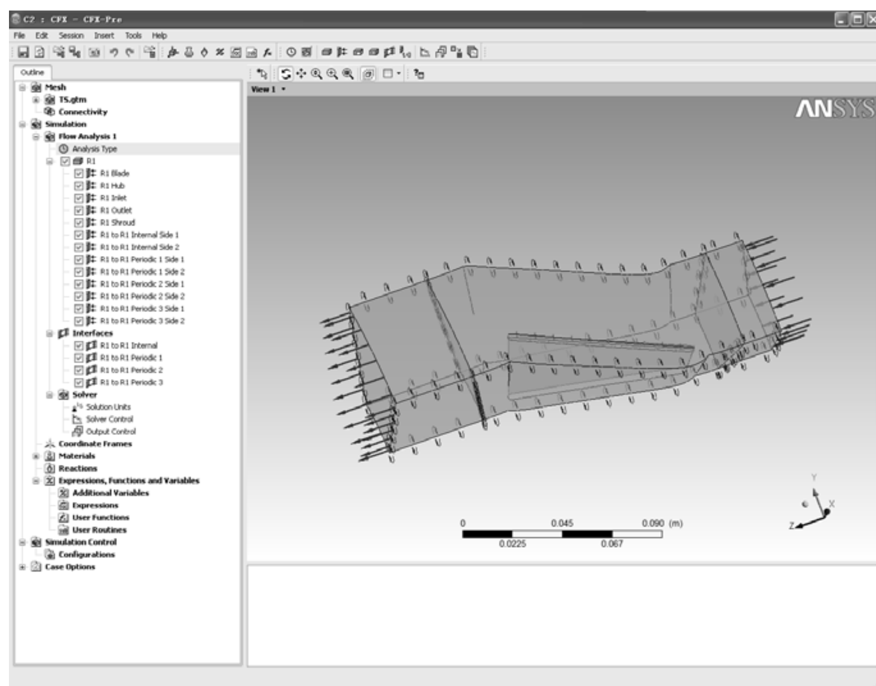


图 6-57 边界条件示意图

19）如图 6-58 所示，双击 Solver 节点下的“Solver Control”项，进行求解器的设置，属性栏展开为如图 6-59 所示的形式。

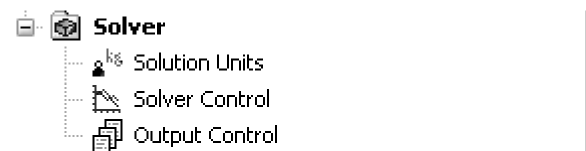


图 6-58 双击“Solver Control”项

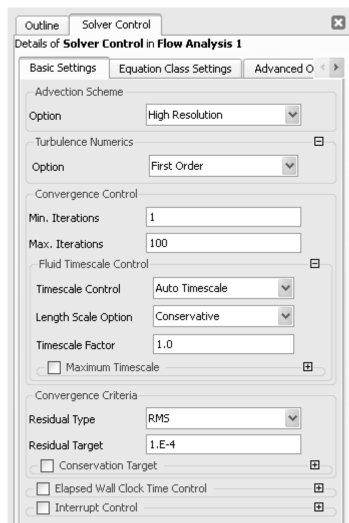


图 6-59 设置求解器

20）如图 6−60 所示，将最大迭代步数“Max. Iterations”项修改为 1000，将残差目标“Residual Target”项修改为 0.00001，即比默认设置降低一个数量级。单击“OK”按钮确认设置。

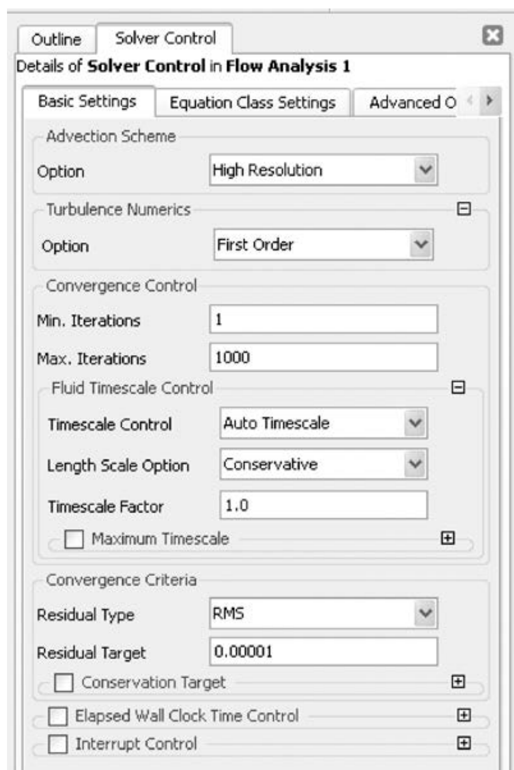


图 6−60　修改最大迭代步数

21）接下来建立出口压力的监测点。双击 Solver 节点下的“Output Control”项，属性栏展开为如图 6−61 所示的形式。

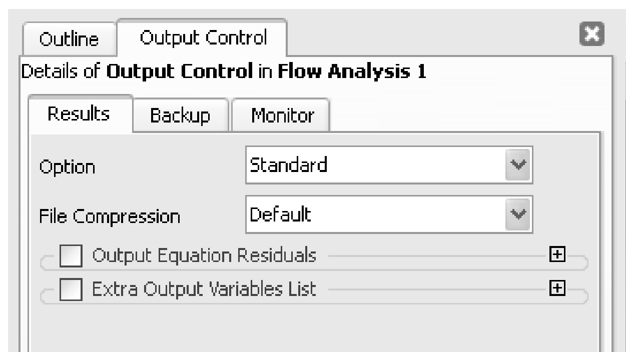


图 6−61　双击“Output Control”项

22）单击图 6−61 所示属性栏中的 Tab 页“Monitor”，勾选“Monitor Objects”项，属性栏展开为如图 6−62 所示的形式。

23）单击□按钮，弹出如图 6-63 所示的“Insert Monitor Name”对话框。

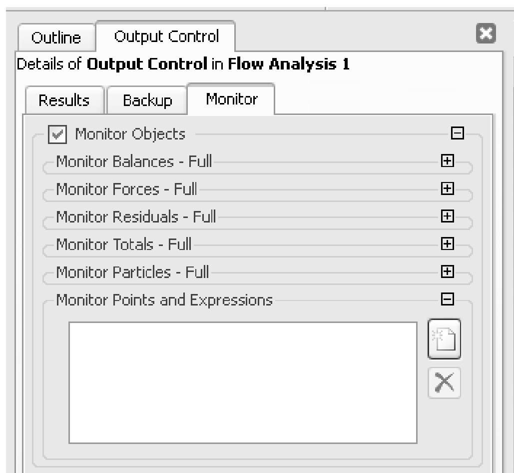


图 6-62　Output Control 项属性栏

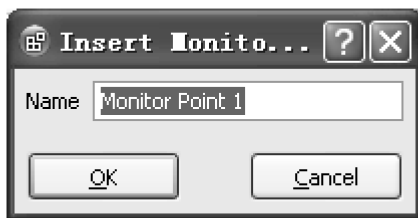


图 6-63　“Insert Monitor Name”对话框

24）设置压力监测点。输入监测点名称“Pressure_Outlet”，单击“OK”按钮确认操作。监测点“Pressure_Outlet”的属性栏如图 6-64 所示。

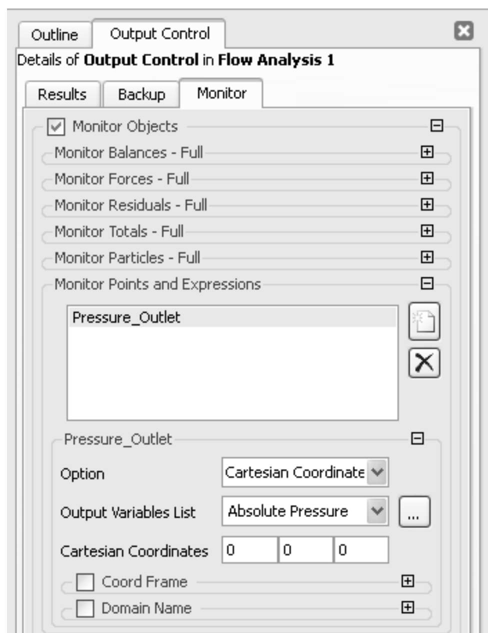


图 6-64　监测点“Pressure_Outlet”的属性栏

25）将“Output Variables List”项更改为“Total Pressure in Stn Frame”，输出该点的总压值。

26）在视图区中旋转叶轮，将出口面对用户。先单击属性栏中的“Cartesian Coordinates”项右侧的任一个数字，再在叶轮出口界面上的任意位置单击一下，即采到该点的三维坐标信息，如图 6-65 所示。单击“OK”按钮确认操作。



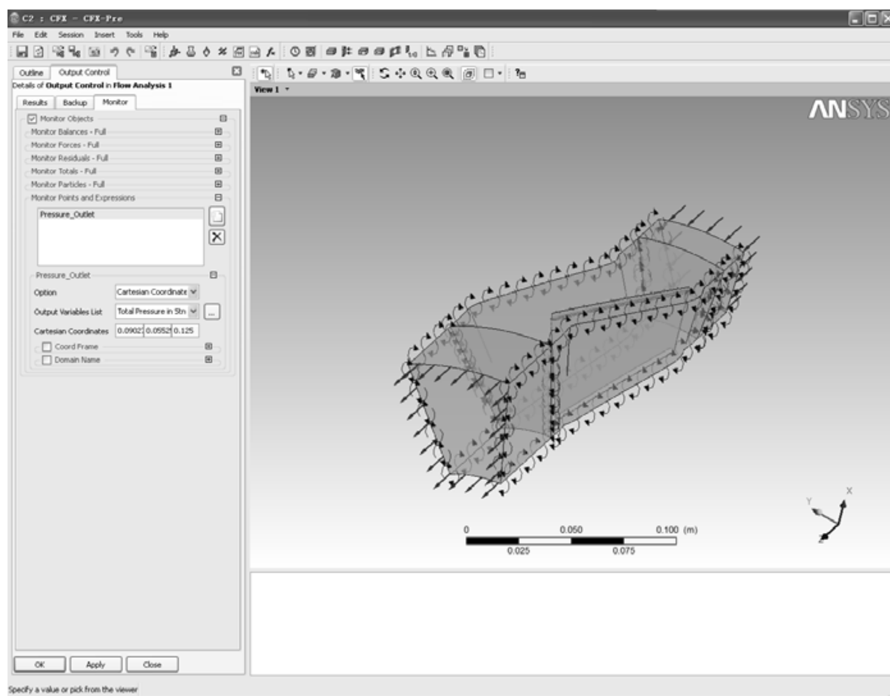


图 6-65　压力监测点的三维坐标信息

27）回到软件主界面，可以看到，“Output Control”栏下出现监测点“Pressure_Outlet”项，同时视图区出口处出现该点的一个黄色标识，如图 6-66 所示。

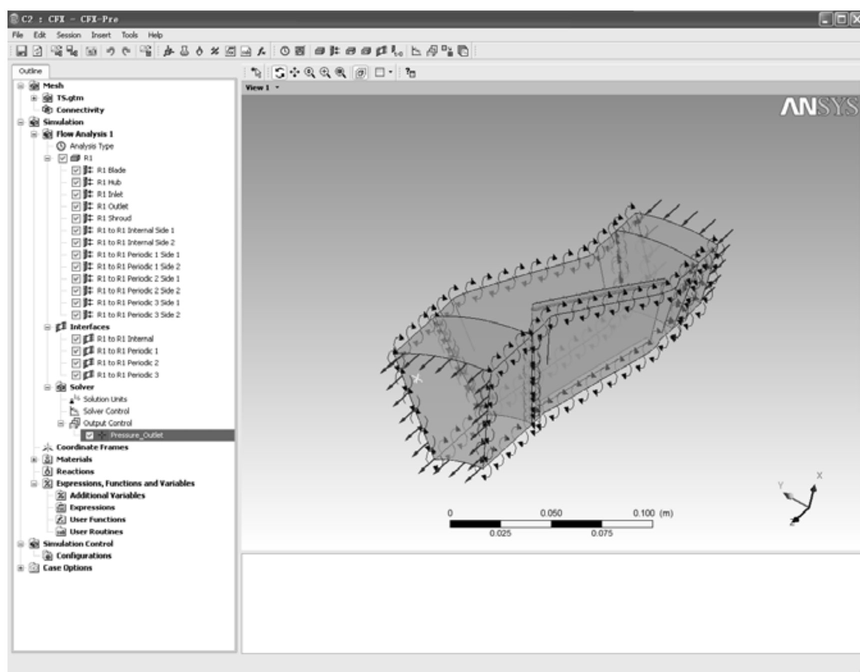


图 6-66　视图区中的压力监测点

28）单击“保存”按钮，保存算例。

6.3.2 CFX-Solver 求解设置

1）返回至 Workbench 工作区，整个项目图如图 6-67 所示，CFX 栏中的“2 Setup”项右侧显示“√”，而“3 Solution”项右侧显示“🔄”，这表明其已完成计算条件设置，可以进行求解计算了。

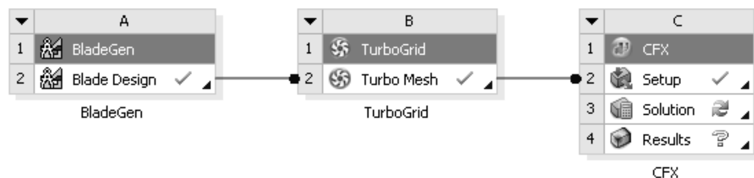


图 6-67 Workbench 工作区中的项目图

2）双击“3 Solution”项，打开“CFX-Solve”模块，如图 6-68 所示。

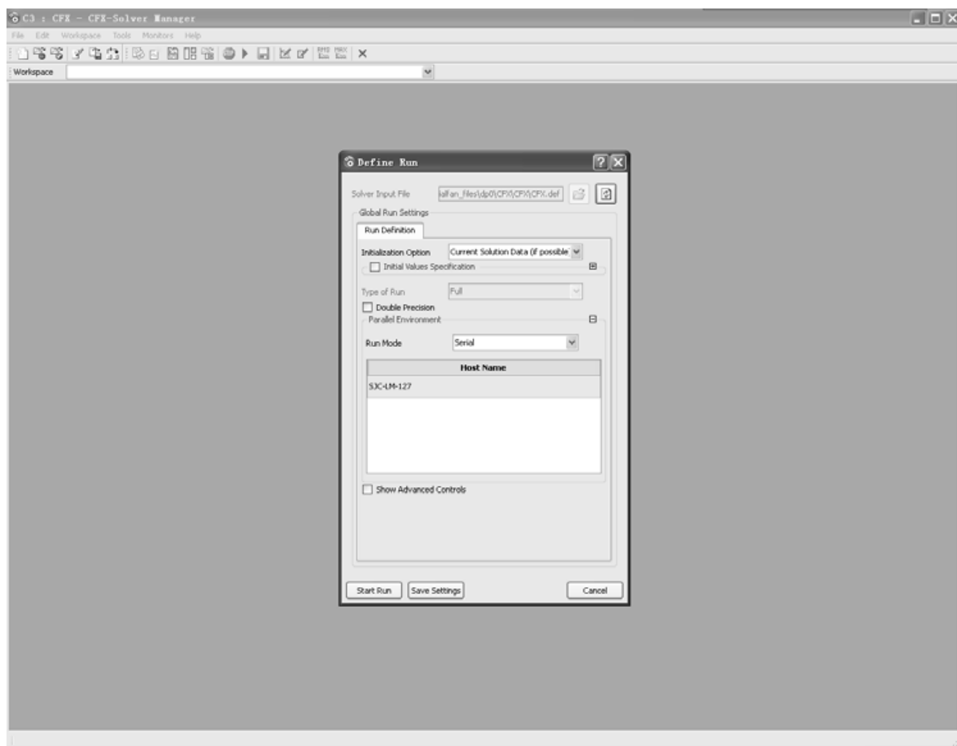


图 6-68 打开“CFX-Solve”模块

3）将“Define Run”对话框中的“Run Mode”更换为“HP MPI Local Parallel”方式，设置为并行运算方式，如图 6-69 所示。

4）单击两次 + 按钮，将网格划分为 4 个分区（Partitions），即采用 4 核并行运算方式，如图 6-70 所示。



注意，此处的操作主要是为了介绍 CFX 的并行计算设置。本章所用例子用单核计算也可很快求解。



图 6-69　设置为并行运算方式

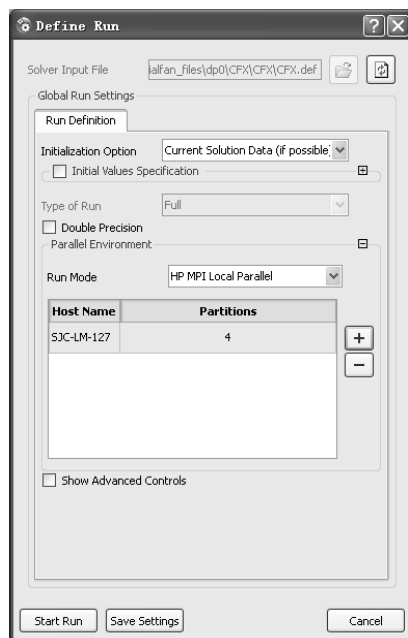


图 6-70　设置为 4 核并行运算方式

5）单击 Start Run 按钮，软件自动加载计算设置并开始计算，如图 6-71 所示。左侧为残差收敛曲线，右侧为每步的计算脚本文件。

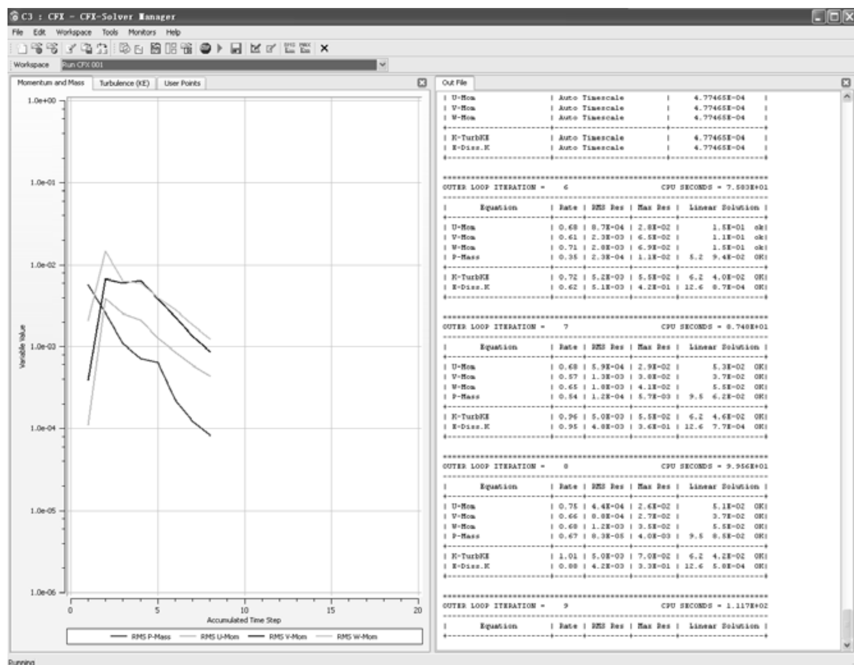


图 6-71　开始计算

6）单击左侧的 Tab 页“User Points”项，用户自定义的监测点压力曲线如图 6-72 所示。

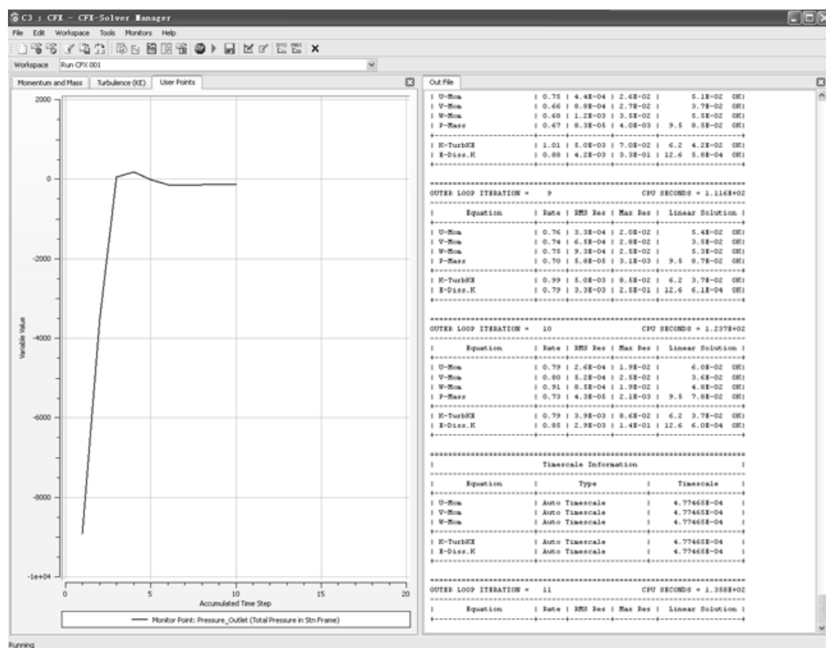


图 6-72　用户自定义的监测点压力曲线

7）进行到第 56 步左右时，监测点总压稳定在 108Pa 附近，且残差曲线达到要求，软件停止计算。残差曲线和监测点压力曲线分别如图 6-73 和图 6-74 所示。

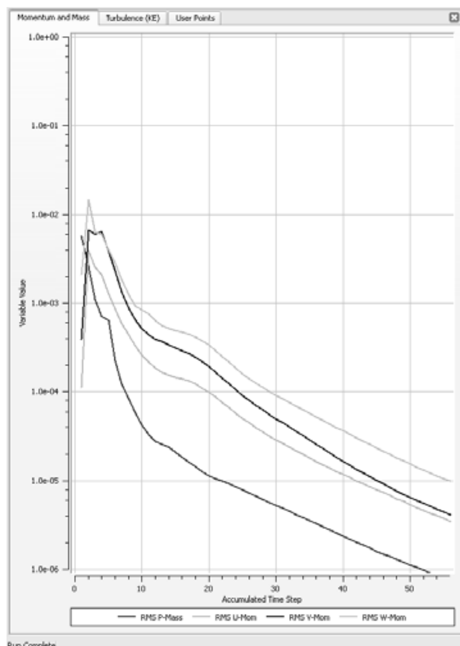


图 6-73　残差曲线

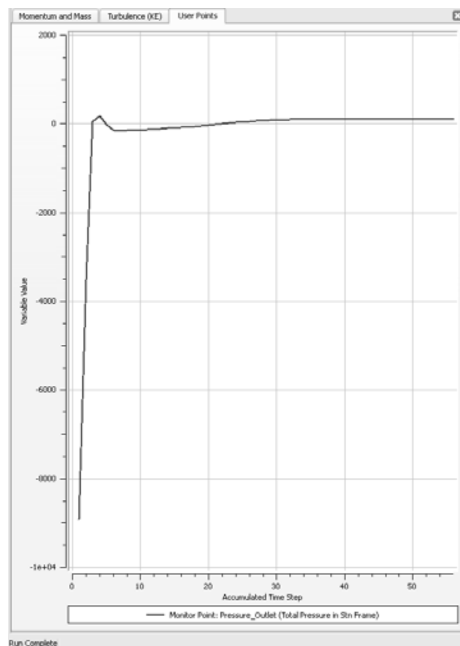


图 6-74　监测点压力曲线

6.3.3 CFX-Post 后处理

1）双击 Workbench 工作区中 CFX 栏中的“4 Results”项，打开 CFD-Post 模块，如图 6-75 所示。

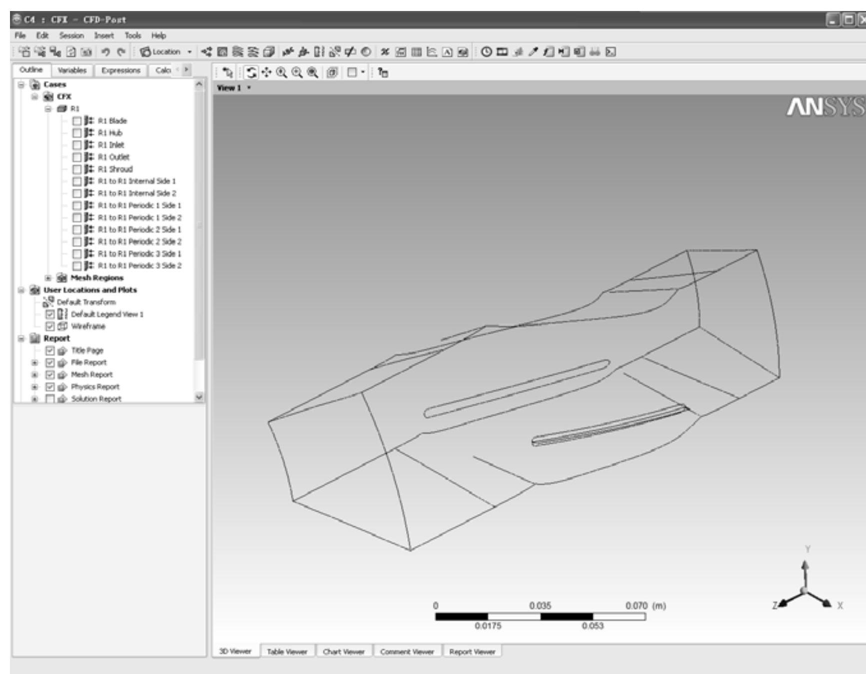


图 6-75　打开 CFD-Post 模块

2）单击工具栏上的 按钮，弹出“Insert Contour”对话框，如图 6-76 所示。

3）输入名称“bladeContour”，单击“OK”按钮， bladeContour 属性栏如图 6-77 所示。



图 6-76 “Insert Contour”对话框

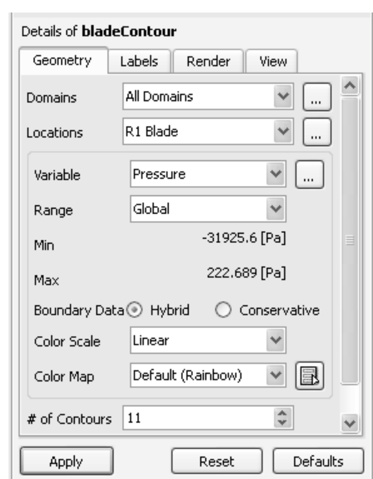


图 6-77　bladeContour 属性栏

4）保持“Locations”项为“R1 Blade”，将“Range”项更改为“Local”方式，将“# of Contours”设置为21，如图6-78所示。

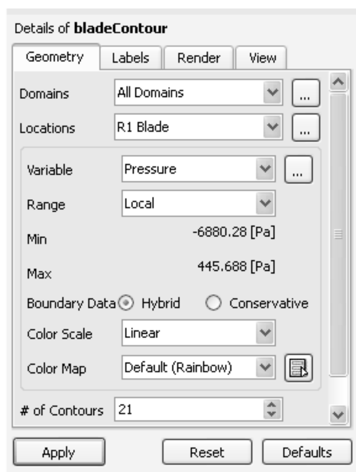


图6-78　设置bladeContour属性

5）单击“Apply”按钮，视图区中的压力面和吸力面的压力云图分别如图6-79和图6-80所示。其中，压力面是叶片旋转时迎风的一面，而吸力面则是背风的一面。

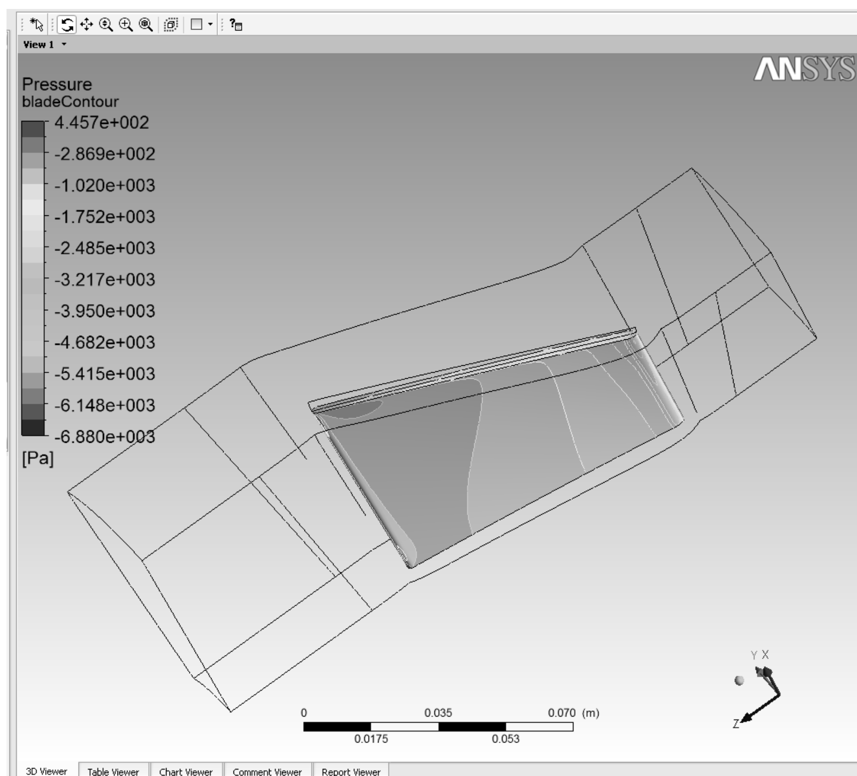


图6-79　压力面的压力云图

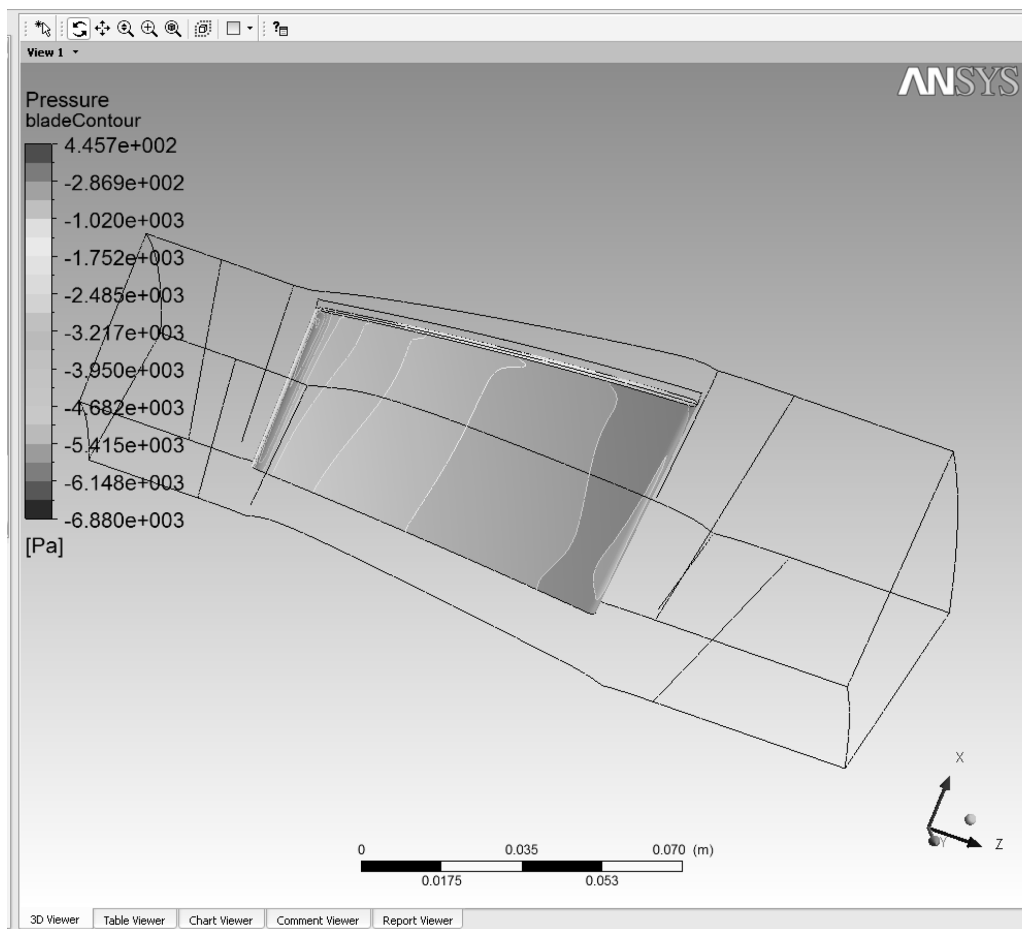


图 6-80　吸力面的压力云图

6）取消选择左侧项目树中的 ☑ bladeContour 项，视图区不再显示叶片表面压力云图。

7）新建压力云图“In and Out”，如图 6-81 所示。



图 6-81　新建压力云图“In and Out”

8）将 In and Out 属性栏中的“Variable”项更改为“Total Pressure in Stn Frame”方式，将“Range”项更改为“Local”方式，将“# of Contours”设置为 21。同时单击 In and Out 属性栏的“Location”项右侧的 … 按钮，在弹出的“Location Selector”中选择“R1 Inlet”和“R2 Outlet”两项，如图 6-82 所示。

9）单击“OK”按钮确认选择。



图 6-82 选择压力云图位置

10）单击“Apply”按钮，叶轮进出口的总压分布图如图 6-83 所示。

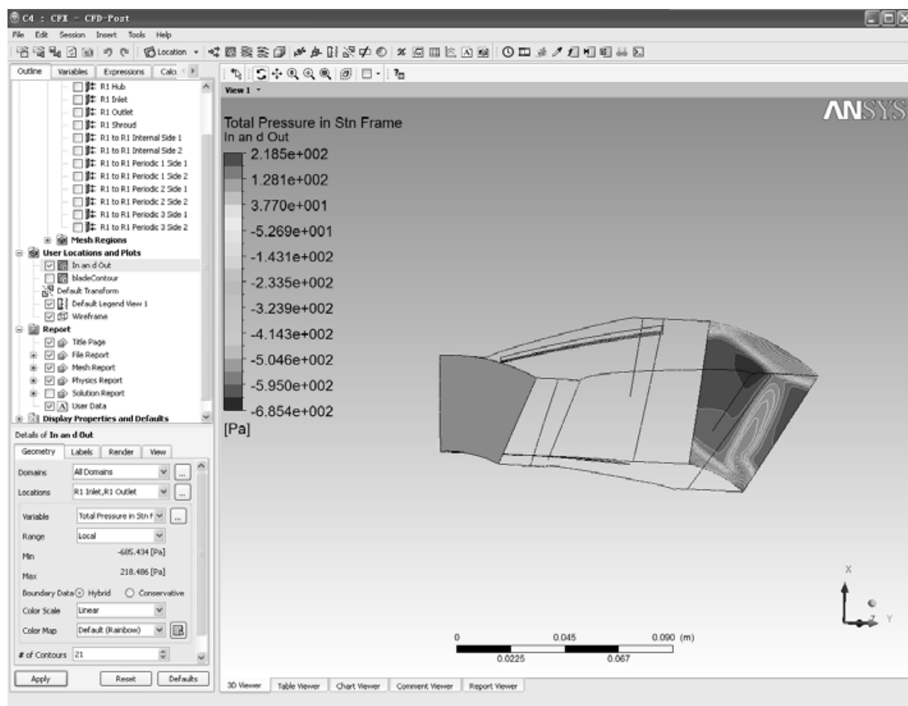


图 6-83 叶轮进出口的总压分布图

11）如果将 In and Out 属性栏中的“Variable”项更改为“Pressure”方式，则叶轮进出口的总压分布图变为静压分布图，如图 6-84 所示。

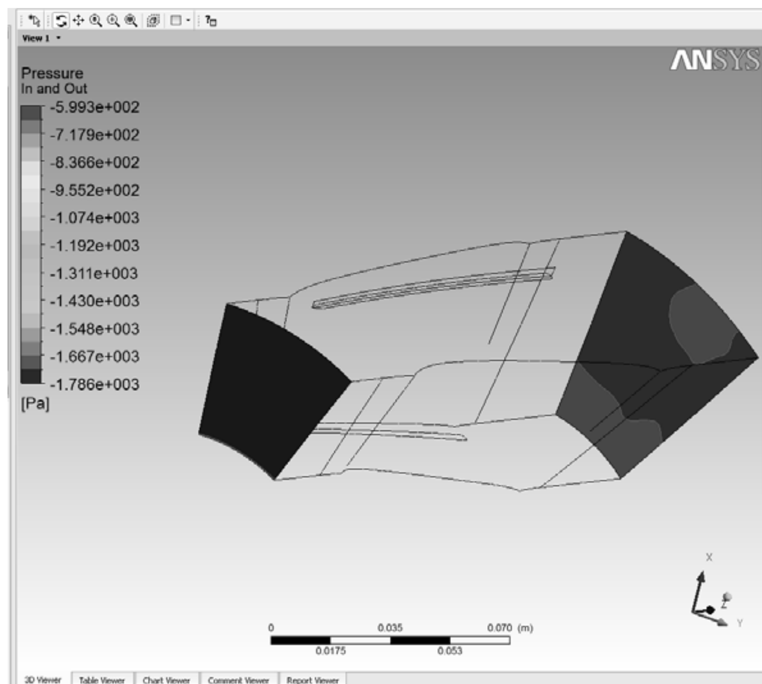


图 6-84　叶轮进出口的静压分布图

12）单击图 6-85 所示中的按钮，直至 Tab 页出现“Turbo”图标，如图 6-86 所示。

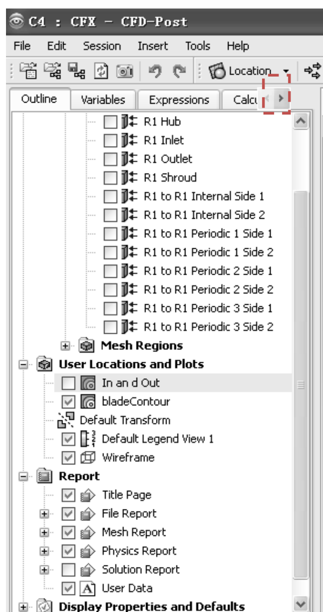


图 6-85　单击 Tab 页拓展按钮

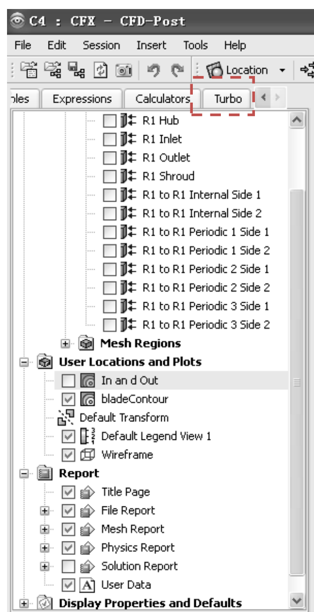


图 6-86　Turbo 工具栏

13）单击“Turbo”图标，叶轮机械的专用后处理模块如图 6-87 所示。

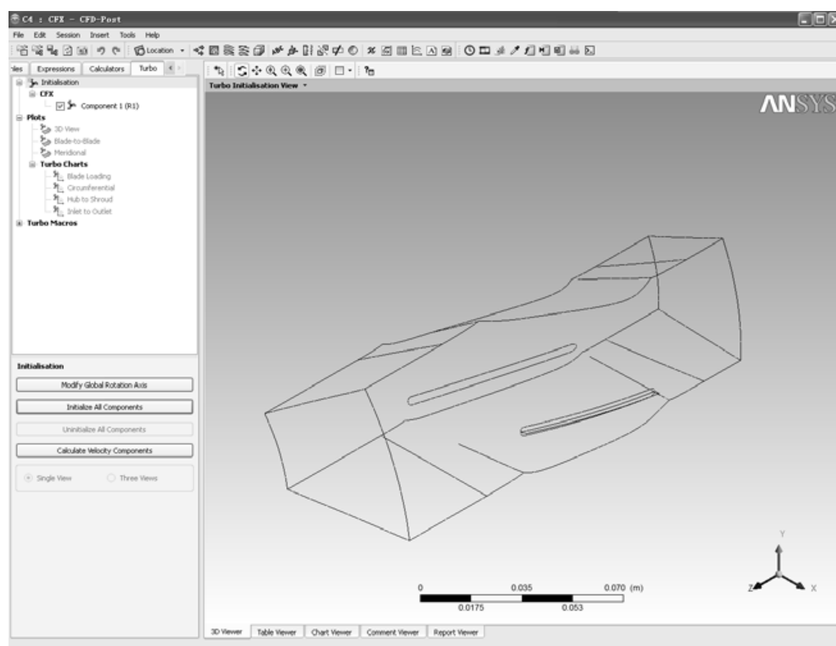


图 6-87　叶轮机械的专用后处理模块

14）单击左下侧的“Initialize All Components”项，左上侧的图标均被激活，视图区出现一个绿色的子午面，如图 6-88 所示。

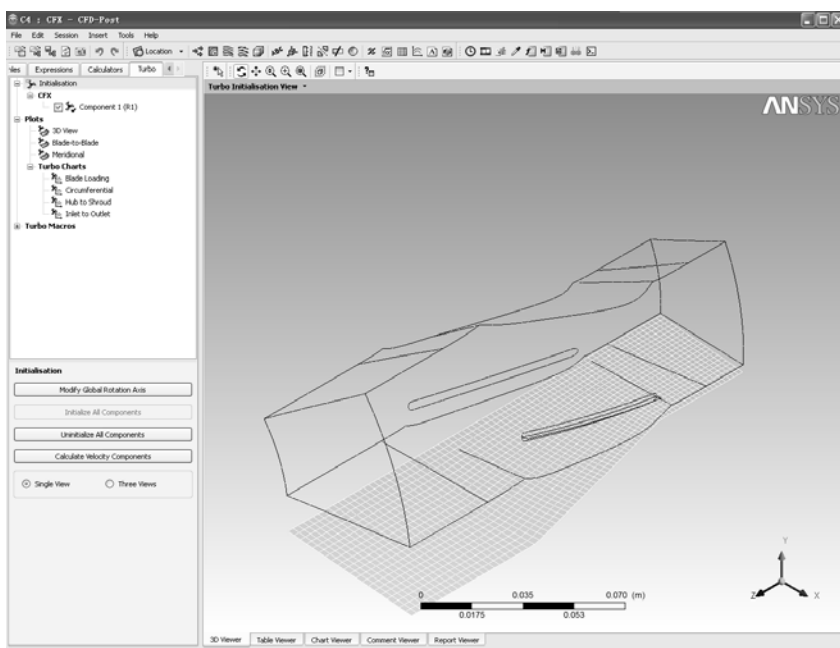


图 6-88　初设的子午面

15）双击 Blade-to-Blade 项，展开“Blade-to-Blade Plot”属性栏，视图区出现根据默认设置绘制的色彩云图。将“Plot Type”项更改为“Contour”，单击“Apply”按钮，某一叶高下的静压云图如图 6-89 所示。

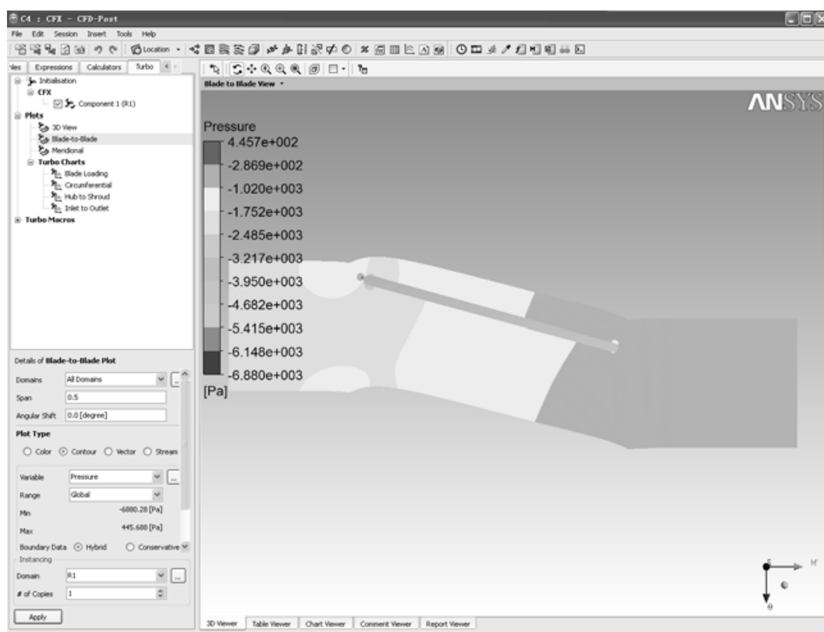


图 6-89　某一叶高下的静压云图

16）将“Span”（叶高）项由 0.5 改为 0.98，另一叶高下的静压云图如图 6-90 所示。此叶高处存在叶顶间隙，故压力云图连续。

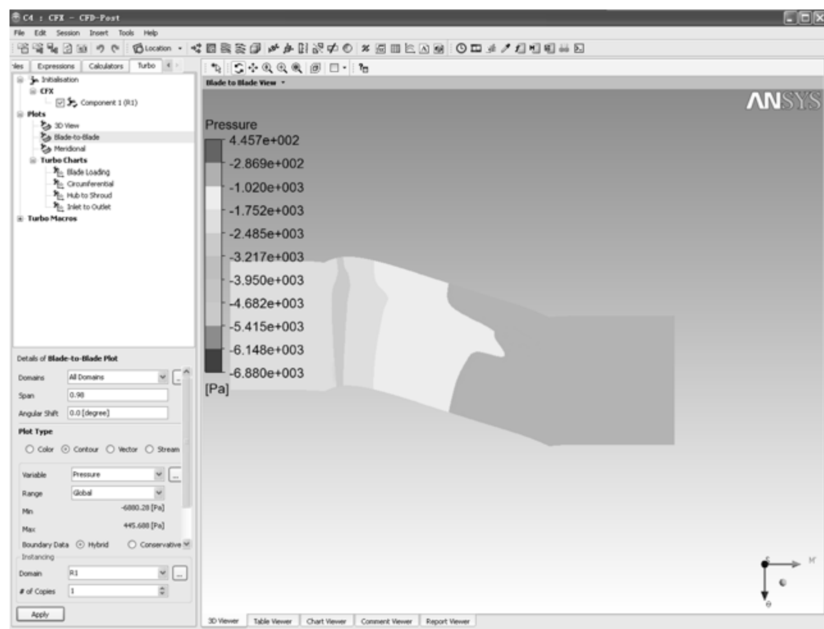


图 6-90　另一叶高下的静压云图

17）将“Plot Type”项更改为“Vector”，该截面的速度矢量图如图 6-91 所示。

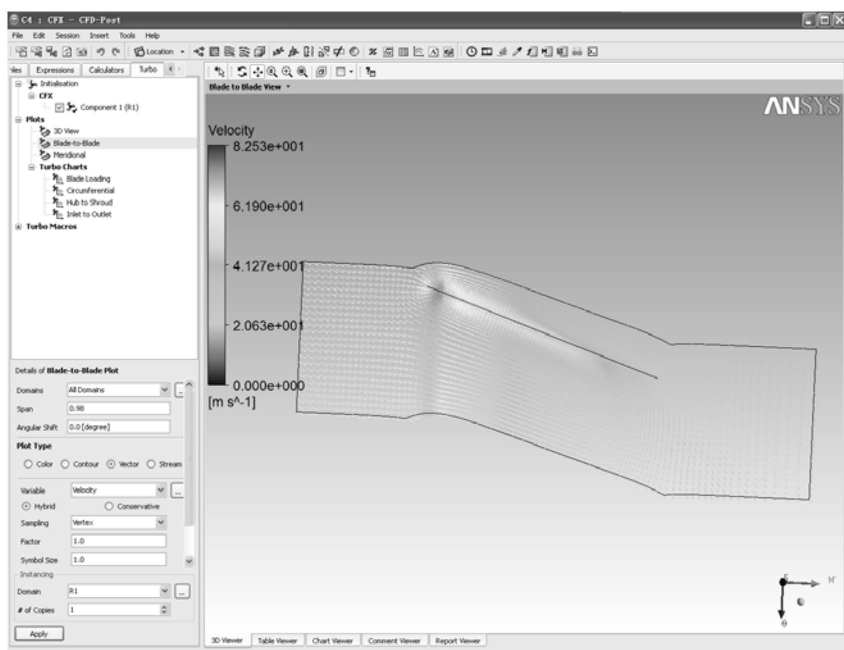


图 6-91　速度矢量图

18）如果放大叶顶区域，可看到该区域存在气流从压力面流向吸力面的情形。叶顶泄漏流动如图 6-92 所示。

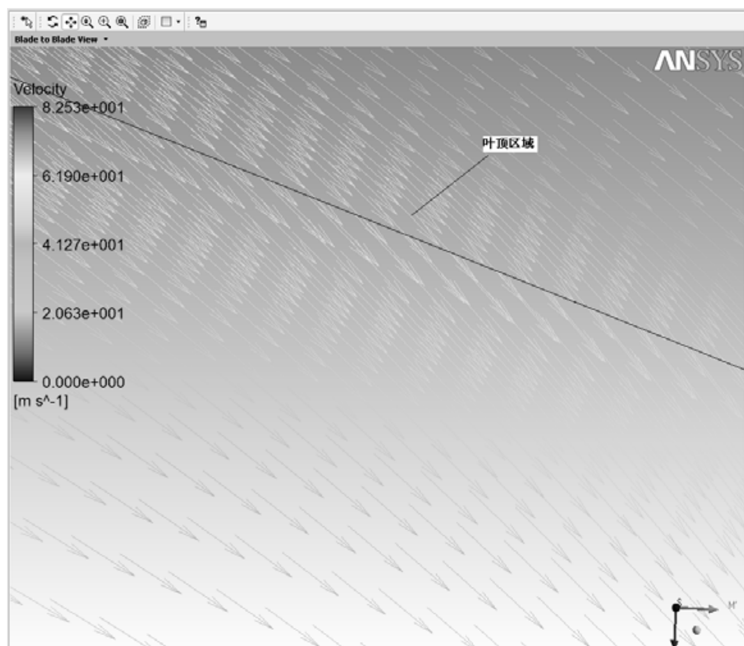


图 6-92　叶顶泄漏流动

19）双击 Meridional 项，展开“Meridional Plot”属性栏，将“Plot Type”项更改为“Contour”，将“# of Contours”更改为 21，单击“Apply”按钮，该子午面静压云图如图 6-93 所示。

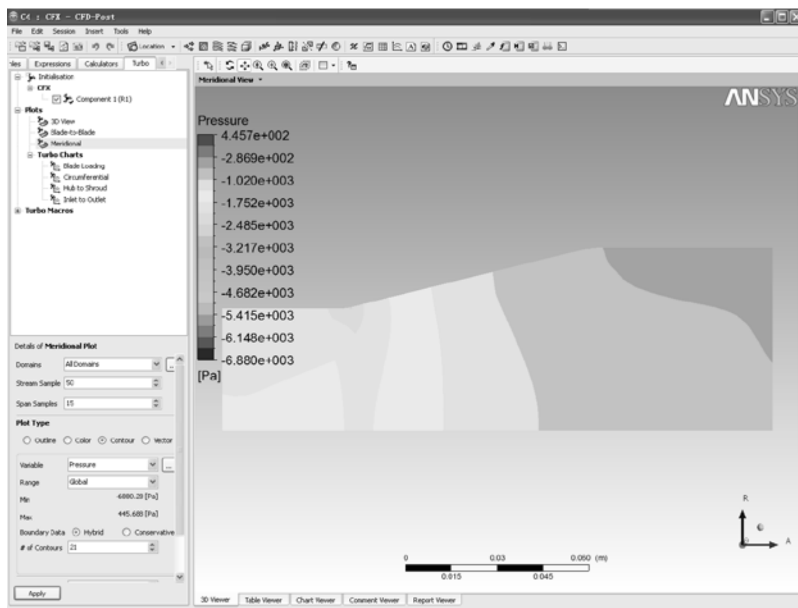


图 6-93　子午面静压云图

20）将“Plot Type”项更改为“Vector”，将“Symbol Size”项更改为 0.5，该子午面速度云图如图 6-94 所示。

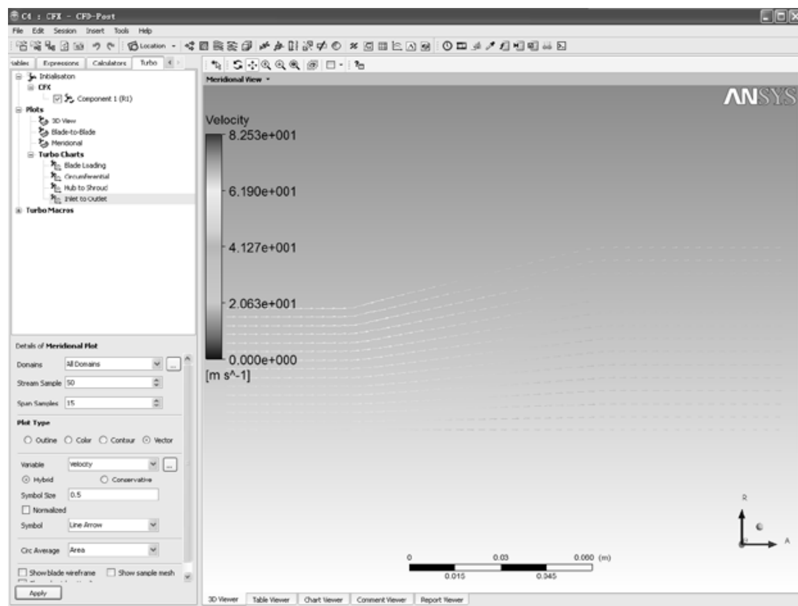


图 6-94　子午面速度云图

21）依次单击图 6-95 所示中的 4 个图表项，默认设置的 4 个图表依次如图 6-96~图 6-99 所示。用户可以根据属性栏中的 Span 等参数，调节显示以下各图表。其中，Blade Loading Chart 为叶片压力面和吸力面压力负荷分布图；Circumferential Chart 为周向压力负荷分布图；Hub to Shroud Chart 为沿叶高压力负荷分布图；Inlet to Outlet Chart 为沿流道压力负荷分布图。

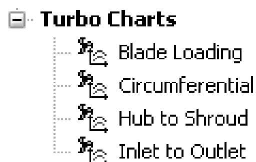


图 6-95 4 个图表项

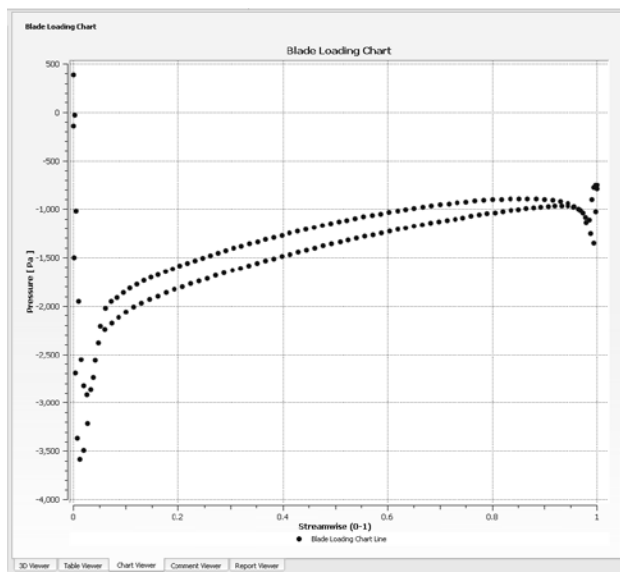


图 6-96 叶片压力面和吸力面压力负荷分布图

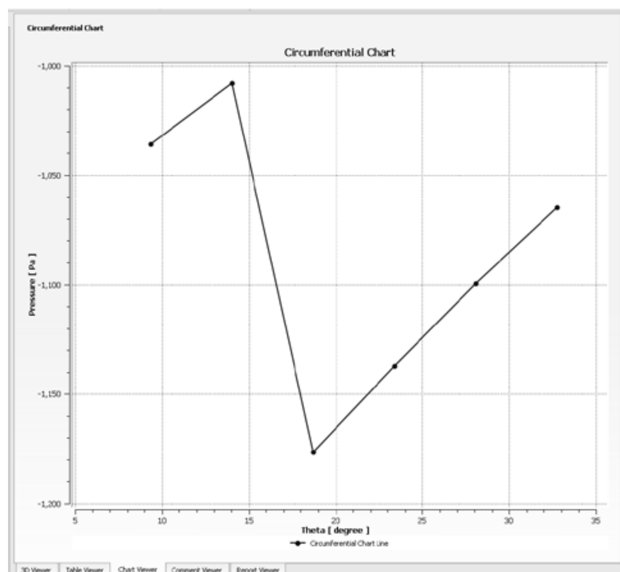


图 6-97 周向压力负荷分布图



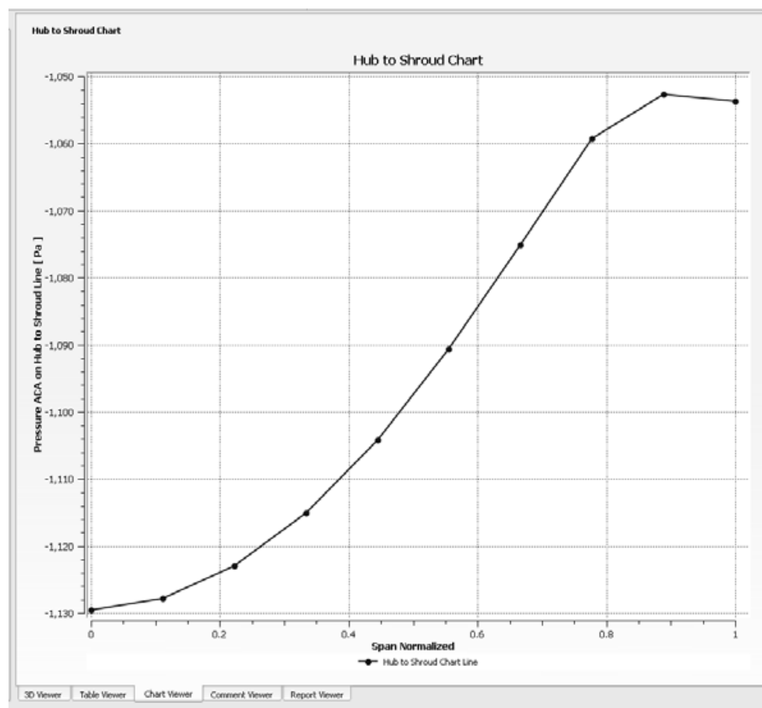


图 6-98　沿叶高压力负荷分布图

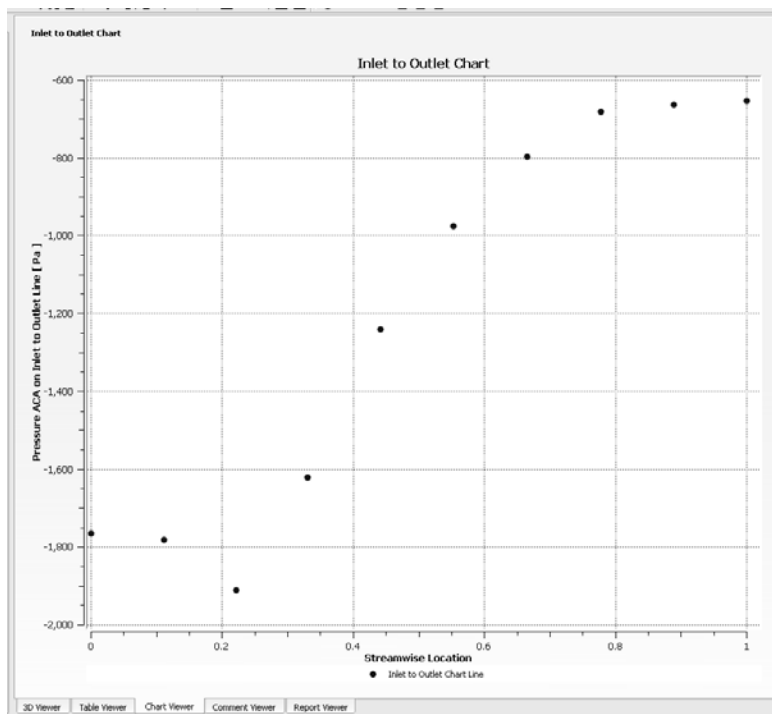


图 6-99　沿流道压力负荷分布图

22）用户还可以单击视图区右下角的 Report Viewer 按钮，生成详细的轴流风机性能分析报告，如图 6-100 所示。

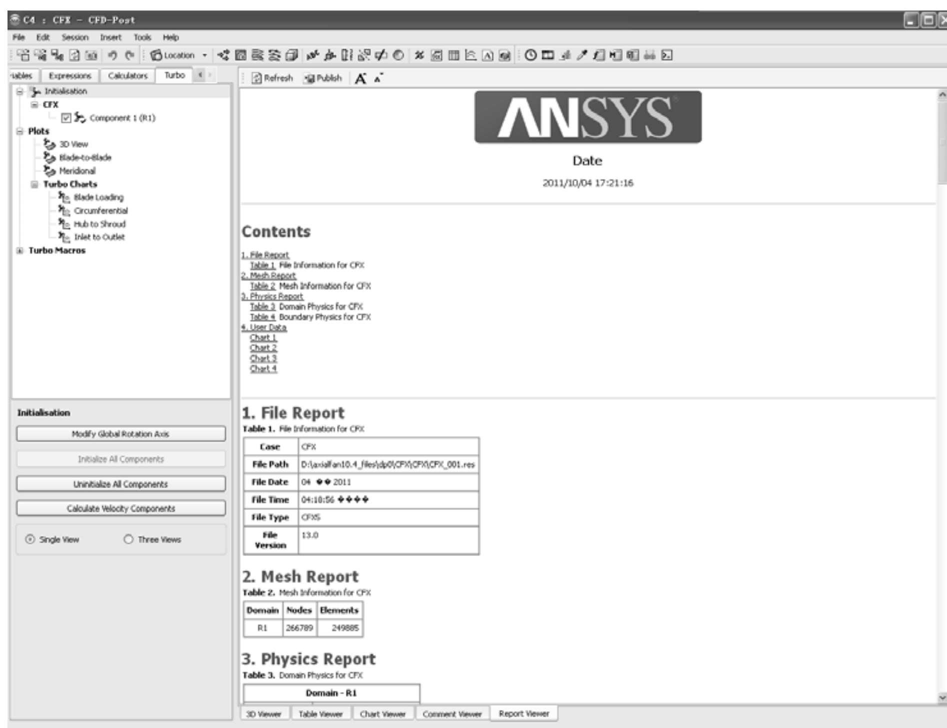


图 6-100 轴流风机性能分析报告

23）报告中包含了以上所有图表。单击 Publish 按钮，将 Report 内容保存为 HTML 或 Text 格式。

第 7 章　其他后处理软件

本章主要内容：

Fieldview 和 TECPLOT 软件的基本功能介绍和使用案例。

本章学习目标：

✧ 掌握 Fieldview 软件的基本功能。
✧ 能使用 Fieldview 软件对流场计算结果进行后处理。
✧ 掌握 Fieldview 软件的函数工具、数值积分和 Flip book 动画等高级功能。
✧ 掌握 TECPLOT 软件的基本功能。
✧ 能使用 TECPLOT 软件对流场计算结果进行后处理。
✧ 掌握 TECPLOT 软件导入 FLUENT 计算结果的方法。

7.1　Fieldview 软件介绍及实例操作

Fieldview 是由全球著名的 CFD 软件商 Intelligent Light 开发的一款功能强大的 CFD 后处理软件。Fieldview 支持各种操作平台、求解器和网格类型，既可帮助用户采用交互式或自动化方式研究 CFD 解算结果，也可对数据进行深入探索，快速提取重要流动特征和关键值，提升 CFD 分析的价值。

Fieldview 可提供专业品质的图像和动画，拥有强大的数据演示和发布功能，可大大强化 CFD 分析结果的视觉冲击力。Fieldview 主要包括以下 3 大特点：

（1）应用广泛

Fieldview 是世界上使用最广泛的 CFD 后处理软件，广泛应用于汽车、化工、航空航天和旋转机械等行业，支持 PC Windows 和 UNIX/Linux 等多种操作系统，拥有目前市场上绝大多数的 CFD 软件接口。

（2）功能强大

Fieldview 拥有一般 CFD 后处理工具的所有功能：云图、矢量图、等值线图；平面、等值面、边界面；流线、脉线、粒子轨道线、二维曲线；文本注释、探针取值、函数计算等。

Fieldview 还拥有一般 CFD 后处理工具所没有的诸多高级功能：关键帧动画、流场特征提取、动态切割、扩展编程、数据演示及发布工具等，支持 OpenGL 模式，显示画面精美而华丽。

（3）易学易用

Fieldview 有统一的面板风格，几乎全鼠标操作，单击 Create 几乎可创建所有图像。

Fieldview 12.0 软件的鼠标操作十分简单：按住鼠标左键，在视图区移动即可实现对物体的平移；按住鼠标中键，在视图区移动，即可实现对物体的旋转；按住鼠标右键，在视图

区移动，即可实现对物体的缩放。Fieldview 软件还常常将“Ctrl”、“Shift”按钮与鼠标联合起来，完成诸如视图区取值点定位和示意箭头标示等工作。

Fieldview 12.0 软件的主界面如图 7-1 所示。其中，软件中间的“图形显示窗口”即视图区。本章将以该软件的基本功能和使用案例为例，进行 Fieldview 12.0 软件的介绍。

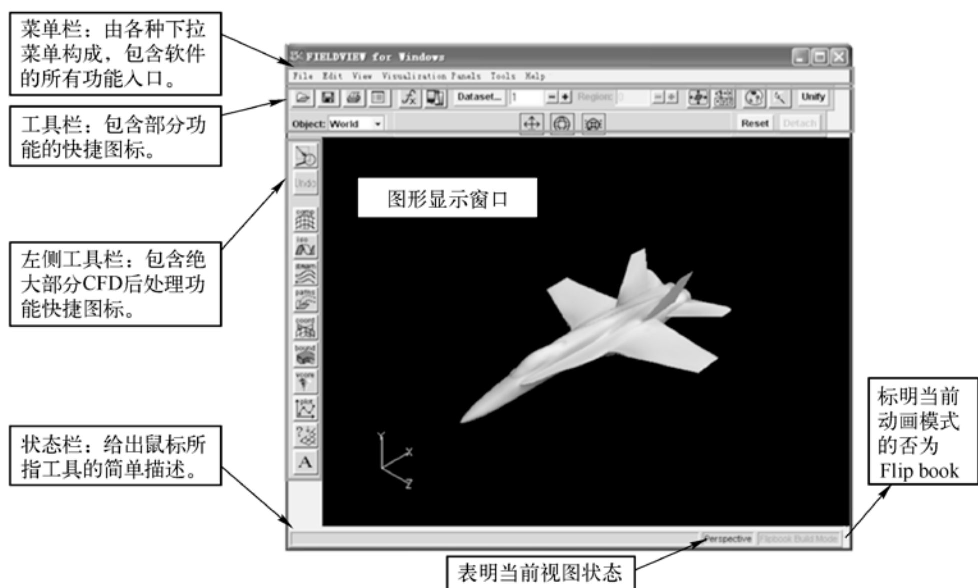


图 7-1 Fieldview 12.0 软件的主界面

7.1.1 Fieldview 菜单栏

Fieldview 软件的菜单栏包括 File、Edit、View、Visualization Panels、Tools 和 Help 6 项。

1. File 菜单

File 菜单的主界面如图 7-2 所示。其中，“Data Input”项包括可导入的各种数据格式，该项的子菜单如图 7-3 所示；“Open Restart”项包括可打开的各种后处理结果，该项的子菜单如图 7-4 所示；“Save Restart”项包括可保存的各种后处理结果，该项的子菜单如图 7-5 所示；“Print”项包括“Image（图片）”和“Plot（曲线）”两种方式，如图 7-6 所示。

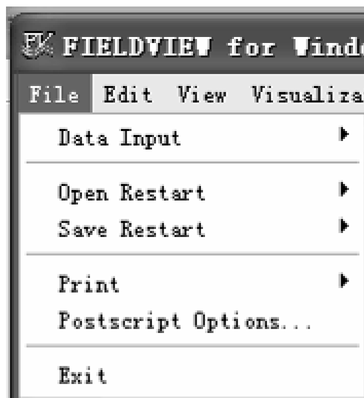


图 7-2 File 菜单的主界面

2. Edit 菜单

Edit 菜单的主界面如图 7-7 所示。其中，“Functions…”项可对输入的网格数据进行等值面和矢量图等操作；“Scalar Colormap…”项包括可选择的各种色图显示方式，该项的“Set Colormap”对话框和 Colormap 的选项分别如图 7-8 和图 7-9 所示；“Copy”项包括“Image（图片）”和“Plot（曲线）”两种

方式，可对图片和曲线进行保存操作。

3．View 菜单

View 菜单的主界面如图 7-10 所示。View 菜单的各个子菜单项对应不同的视图区显示方式，如定义视图位置（Defined…）、更改背景颜色（Background Color…）和各帧之间的最小时间（Minimum Time Between Frames…）等。

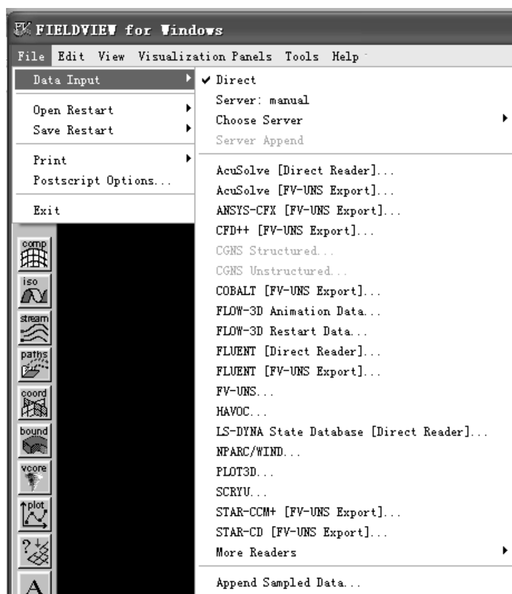


图 7-3　Data Input 的子菜单

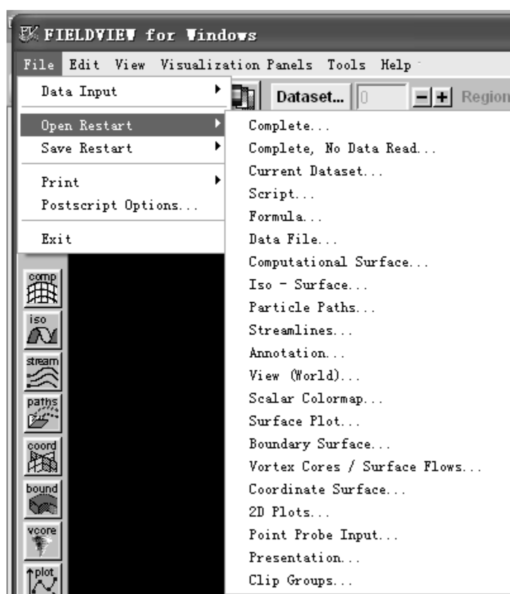


图 7-4　Open Restart 的子菜单

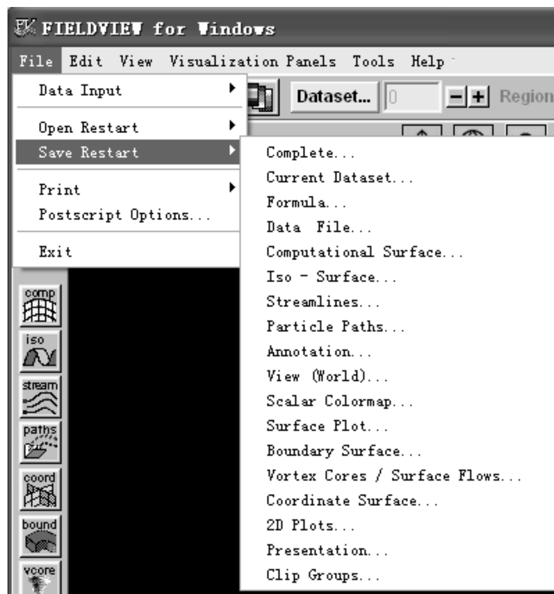


图 7-5　Save Restart 的子菜单

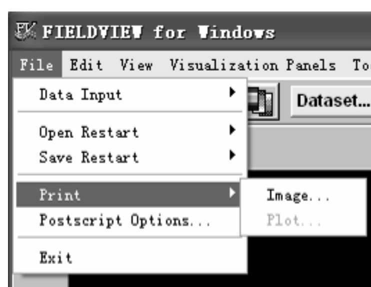


图 7-6　Print 的子菜单

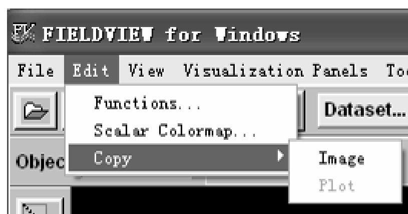


图 7-7　Edit 菜单的主界面

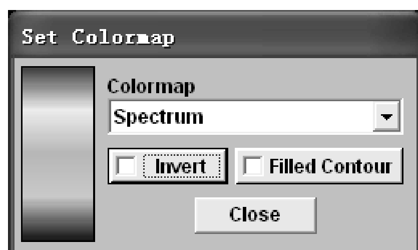


图 7-8 “Set Colormap”对话框

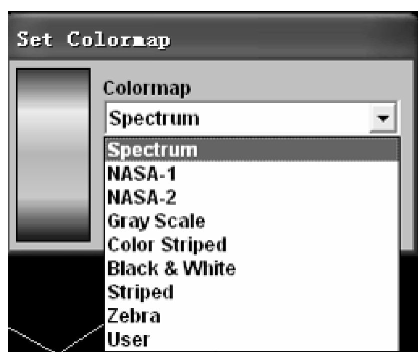


图 7-9 Colormap 的选项

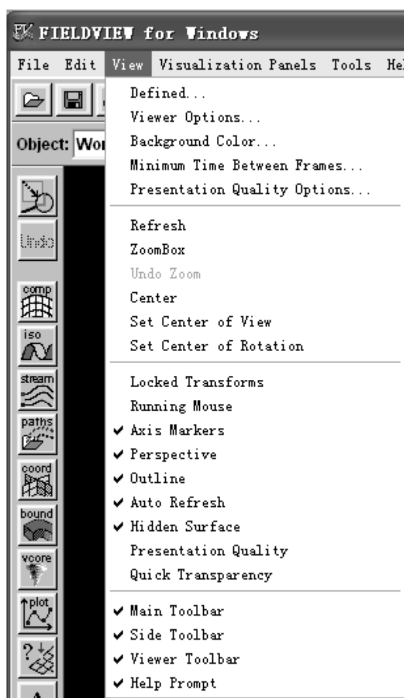


图 7-10 View 菜单的主界面

4．Visualization Panels 菜单

Visualization Panels 菜单的主界面如图 7-11 所示。Visualization Panels 菜单的各个子菜单项对应左侧工具栏的各种后处理方式。

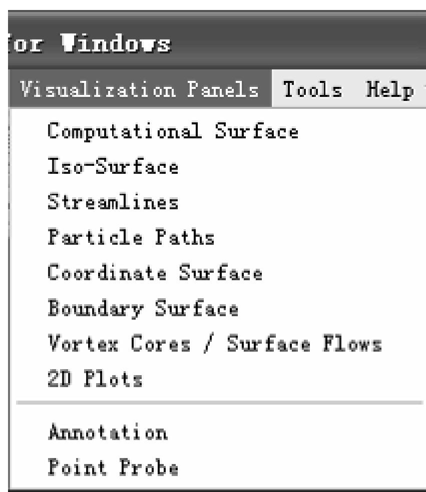


图 7-11 Visualization Panels 菜单的主界面

5．Tools 菜单

Tools 菜单的主界面如图 7-12 所示。Tools 菜单的各个子菜单项对应软件的一些高级功能，如函数积分和关键帧动画等。

6．Help 菜单

Help 菜单的主界面如图 7-13 所示。Help 菜单包括软件自带的帮助内容和帮助使用说明，并可进行相关查询。

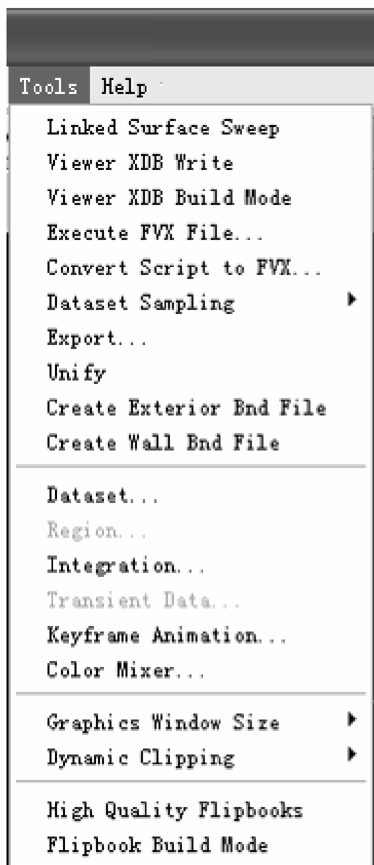


图 7-12　Tools 菜单的主界面



图 7-13　Help 菜单的主界面

7.1.2 Fieldview 左侧工具栏

Fieldview 左侧工具栏各项工具的功能见表 7-1。

表 7-1　Fieldview 左侧工具栏各项工具的功能

工具名称	对话框英文名称	对应图标	功　　能
局部放大工具			放大显示所选择区域
撤销操作工具			撤销本次操作，恢复到上一步操作
计算面工具	Computational Surface		可实现计算空间的 i，j，k 平面的绘制； 支持单块、多块、混合、叠加和嵌合等多种类型结构化网格，高度保持数据的准确度； 可显示为云图、矢量图、等值线，单色图，网格；设定域值，控制显示范围； 显示/隐藏，透明度； 整模型扫略（sweep） 动画



（续）

工具名称	对话框英文名称	对应图标	功　　能
等值面工具	Iso Surface		可实现任意流场标量参数等值面； 坐标等值面； 任意空间截面； 可显示为矢量图、其他标量云图或等值线，单色图，网格； 设定域值，控制显示范围； 显示/隐藏，透明度； 整模型扫略（sweep） 动画
流线/脉线工具	Streamlines		种子添加方法： 屏幕点、坐标点 任意直线、曲面 辅助平面 矩形面、圆面、球面 显示方式： 连续线 丝带 线段线 点线 球线 单球+线 显示颜色： 标量色 单色 显示/隐藏； 动画显示 （连续线，丝带方式不支持动画）； 导出流线文件，获得驻留时间
颗粒轨道线工具	Particle Paths		支持 STAR-CCM+、CFX 等自带的颗粒轨道记录文件； 显示方式： 连续线 点线 球线 单球+线 显示颜色： 标量色 单色 显示/隐藏； 动画显示 （连续线方式不支持动画）
坐标面工具	Coordinate Surface		可实现 x, y, z 或 r, θ, z 平面的绘制； 可显示为云图、矢量图、等值线，单色图，网格； 设定域值，控制显示范围 显示/隐藏，透明度； 整模型扫略（sweep）动画
边界面工具	Boundary Surface		单个边界面或任意边界面组合； 可显示为云图、矢量图、标量等值线，单色图，外边框，网格； 设定域值，控制显示范围； 显示/隐藏，透明度
旋涡显示工具	Vortex Cores/Surface Flows		显示流场中的旋涡和旋涡中心； 显示表面流线
二维曲线工具	2D-plot		曲线类型： 空间任意两点之间的直线 坐标平面与曲面（comp，iso，bound…）相交线 空间截面与曲面相交线 按网格采样或均匀采样； 支持嵌入式二维曲线； 支持动画显示

（续）

工具名称	对话框英文名称	对应图标	功　　能
探针取值工具	Point Probe		按坐标定位任意位置、任意标量和矢量值； 视图区显示点； 鼠标取点时可返回该点坐标值； 点位置文件输出
注释工具	Annotation	A	可在图形界面中创建任意个注释文本； 可任意调节文本位置和大小，变换文字方向； 可在图形界面中创建注释箭头； 可任意调节箭头位置、大小和指向； 控制颜色、显示或隐藏； 箭头标注（按住〈Shift〉键和鼠标左键拖动即可）

7.1.3 其他工具

1．函数工具

函数工具（Function Specification），包括多种常规函数，以及多种高级函数：

- 梯度，散度，旋度函数（grad，div，curl）。
- 可实现涡量计算（vorticity calculation，mag（curl（“velocity”）））。
- 点积、叉积。
- 分量提取：VecX（“Velocity”）。

单击工具栏按钮，“函数工具”对话框如图 7-14 所示。单击图 7-14 所示对话框下方的“Create”按钮，出现“Function Formula Specification”对话框，如图 7-15 所示。图 7-15 所示对话框中包括“Constants（常量）”、“Operations/Keys（函数）”和“Quantities（变量）”3 类工具。通过图 7-15 所示对话框，可以定义用户需要分析的函数或变量，在“Formula”项的空白栏中输入函数或变量的名称即可。

2．数值积分

数值积分（Numerical Simulation）可实现任何面（Surface）、部分面（Partial）和组面（Surface Group）的积分；可获得几何体表面的面积、通量、平均值；也可获得力，如升力和阻力等。如图 7-16 所示，选择排水歧管的一个出口，可以求得该面上的截面面积、流量、平均速度、平均压力和平均温度等变量（包括标量和矢量）。

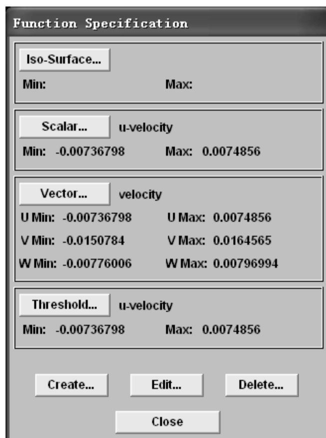


图 7-14 “函数工具”对话框

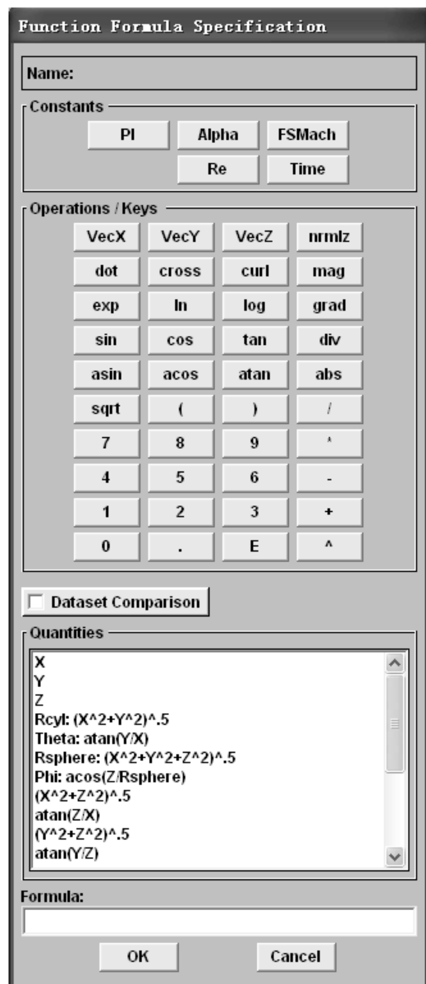


图 7-15 “Function Formula Specification”对话框

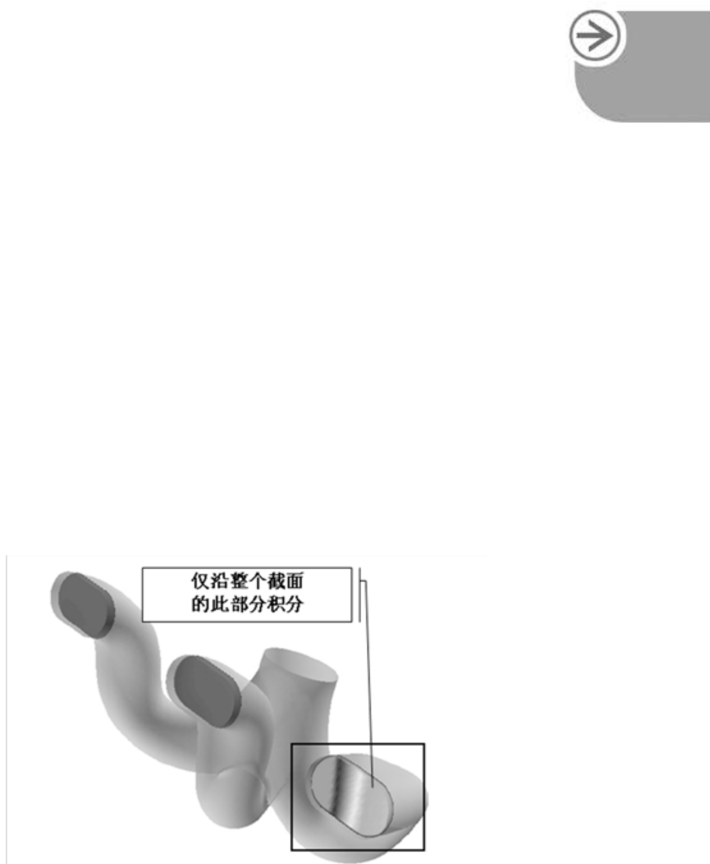


图 7-16 排水歧管出口的变量积分

3．Flip book 动画

Flip book 动画（Flip book animation）是一种简易动画方式，方便快捷，一键生成。可动画显示任意变量在计算域内扫掠效果。关于 Flip book 动画，后文会有详细讲述。

4．关键帧动画

关键帧动画（Key frame animation）是一种功能强大的动画制作方式。通过建立多个轨道和在不同轨道上设置关键帧，可以实现非常复杂的动画控制，包括诸如爆炸、多面多模型扫掠和渐现渐隐等特殊效果。

7.1.4 散热器热性能计算后处理

1．导入计算结果文件

1）如图 7-17 所示，选择［File］>［Data Input］>［FV-UNS…］菜单命令，导入 Fieldview 软件适用格式的散热器热性能计算结果文件。如图 7-18 所示，单击对话框中的“Read Grid or Combined Data…”按钮，选择“cocurrent.uns”文件，单击“打开”按钮，导入文

件，如图 7-19 所示。

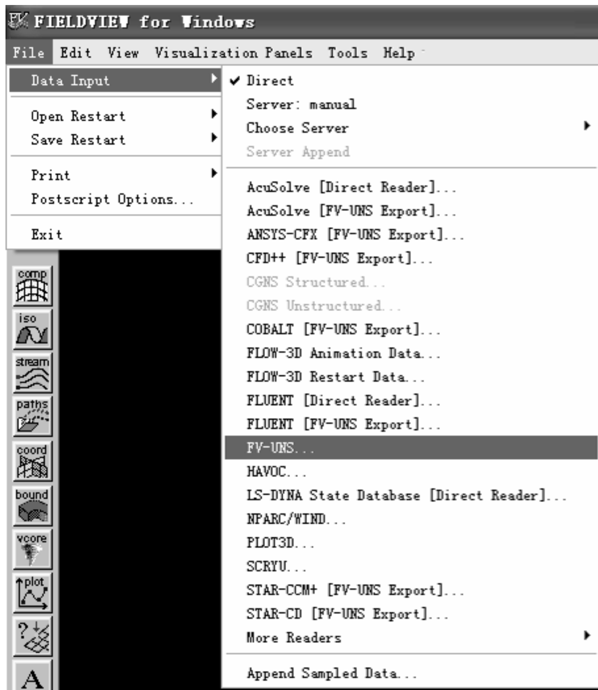


图 7-17　导入散热器热性能计算结果文件

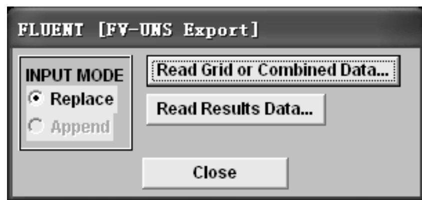


图 7-18　读入网格文件

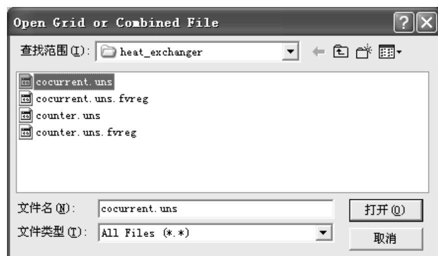


图 7-19　选择“cocurrent.uns”文件

2）在弹出的“Function Subset Selection”对话框中选择“Function Names”栏中的所有变量，如图 7-20 所示。单击“OK”按钮，完成计算结果的导入。

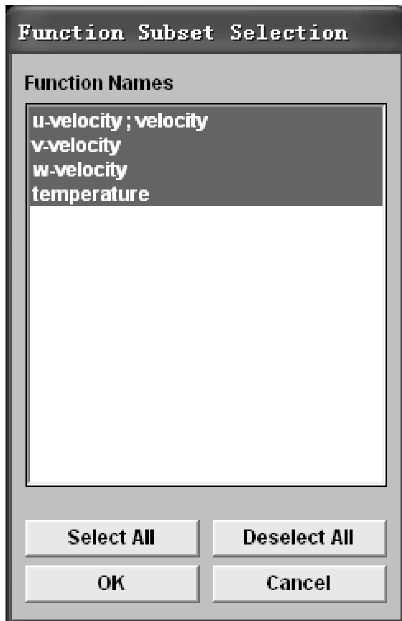


图 7-20　选择所有变量

3）导入变量后的散热器外轮廓（本题中为长方体形式）如图 7-21 所示。

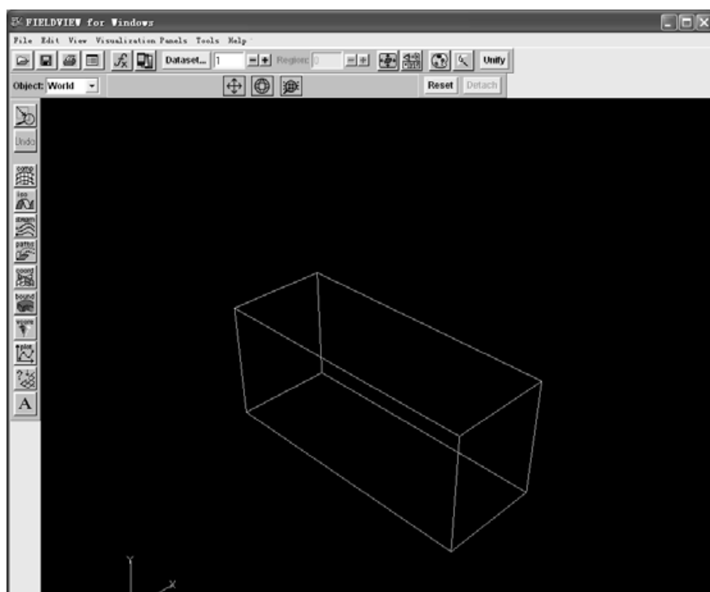


图 7-21　导入变量后的散热器外轮廓

2．散热器几何体显示

1）单击左侧的工具栏按钮，弹出如图 7-22 所示的“Boundary Surface”对话框。如图 7-23 所示，单击 Tab 页“Surface”下的“Create”按钮，所有按钮生效，选择“BOUNDARY TYPES”栏中出现散热器的所有边界。

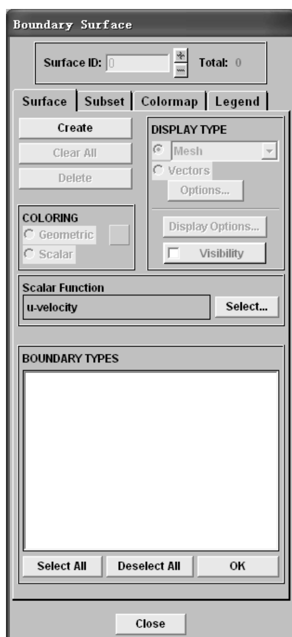


图 7-22　“Boundary Surface”对话框

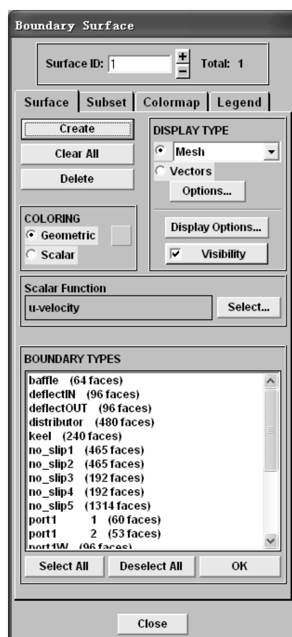


图 7-23　生成 Boundary Surface

2）将“DISPLAY TYPE”栏中的“Mesh”项更改为“Smooth”，同时单击对话框下方的“Select All”按钮，选择所有边界。单击“OK”按钮，视图区的散热器如图 7-24 所示。

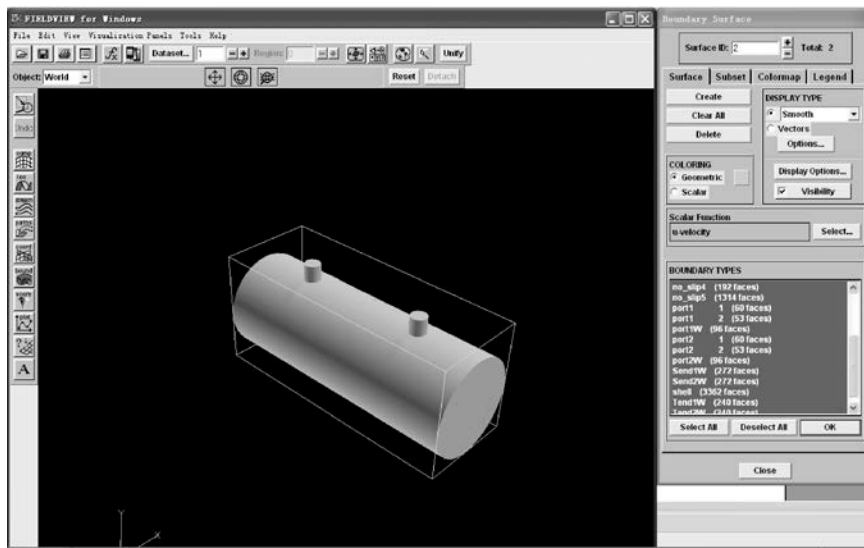


图 7-24　视图区的散热器

3）单击“COLORING”栏中的“Geometric”项右侧的按钮▭，出现如图 7-25 所示的“Geometry Color”对话框，选择不同的颜色，可改变视图区中散热器的颜色。

3．散热器温度场显示

1）将“COLORING”栏中的“Geometric”项更改为“Scalar”，切换到变量对应的云图模式。单击“Scalar Function”栏中的“Select…”按钮，在出现的“Function Selection”对话框中选择“temperature”项作为显示变量，如图 7-26 所示。单击“Calculate”按钮，确认操作。

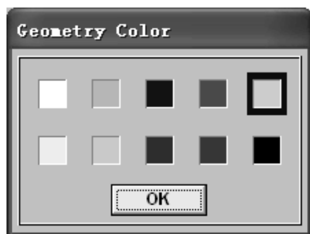


图 7-25　“Geometry Color”对话框

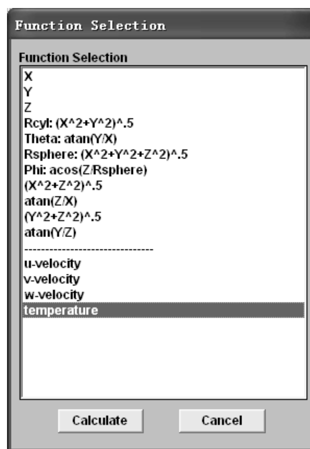


图 7-26　选择“temperature”项作为显示变量

视图区中的散热器表面温度如图 7-27 所示。

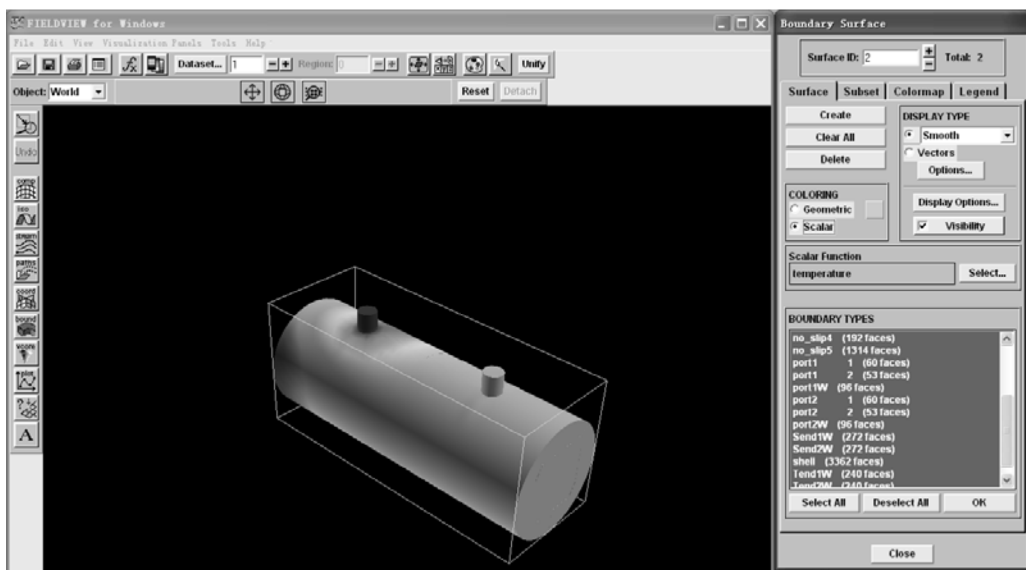


图 7-27 视图区中的散热器表面温度

2）选择［Edit］>［Copy］>［Image］菜单命令，可复制以上视图。后面的操作对应的视图，均可按该命令进行复制操作。

3）单击“Boundary Surface”对话框中的“Clear All”按钮，可以清除散热器的表面温度显示。

4．散热器内部温度显示

1）单击左侧的工具栏按钮，出现“Coordinate Surface”对话框。单击 Tab 页“Surface”下的“Create”按钮，所有按钮生效，如图 7-28 所示。

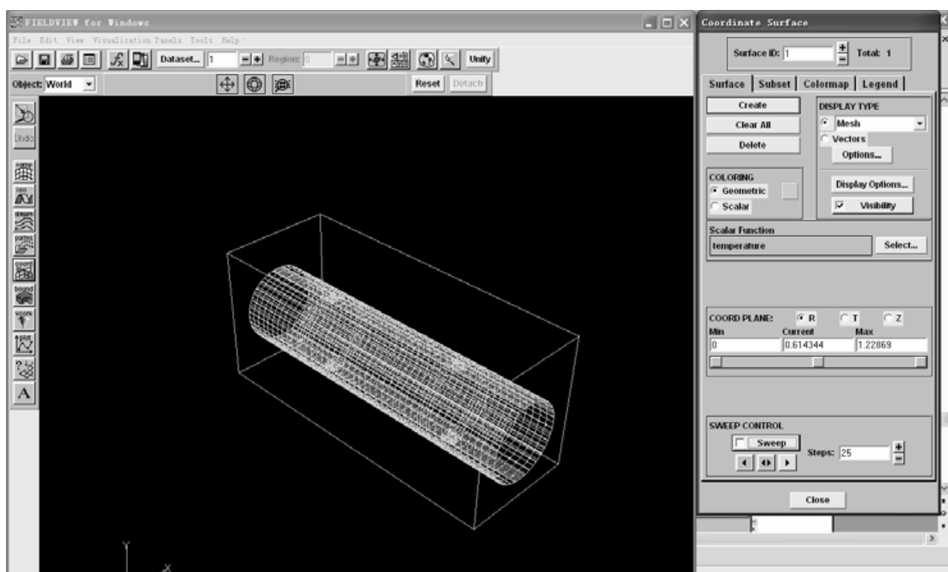


图 7-28 生成 Coordinate Surface

由于图 7−28 中的“COORD PLANE”默认选择“R”项，即“径向”的意思，图 7−28 中指的是半径为 0.614344 m 的散热器内部圆周面，以网格形式显示。

2）将“COLORING”栏中的“Geometric”项更改为“Scalar”，切换到变量对应的模式。同时将“DISPLAY TYPE”栏中的“Mesh”项更改为“Smooth”，切换到光顺的云图模式。视图区中散热器的圆周面温度云图如图 7−29 所示。

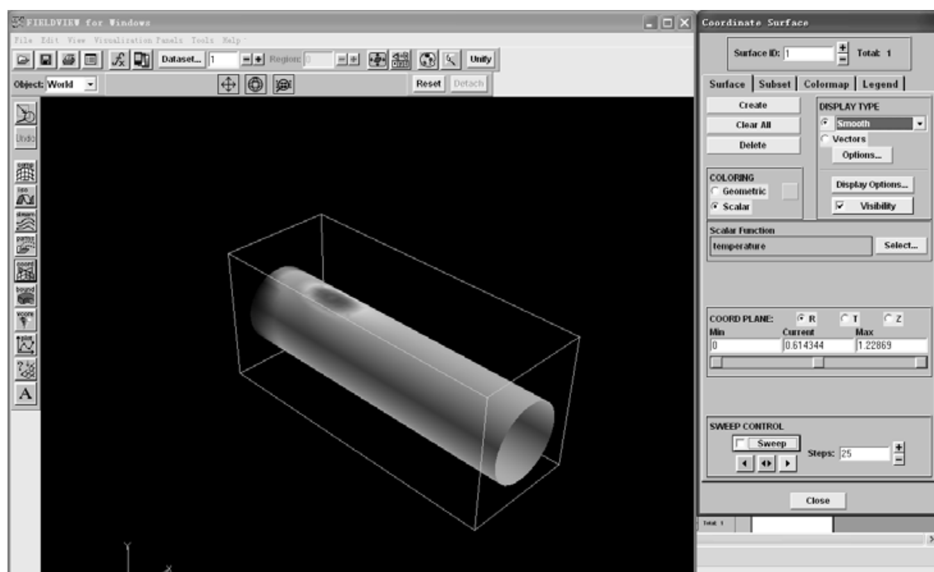


图 7−29　视图区中散热器的圆周面温度云图

3）如果将“DISPLAY TYPE”栏中的“Smooth”项更改为“Contours”，则切换到等值线模式。视图区中散热器圆周面的温度等值线如图 7−30 所示。

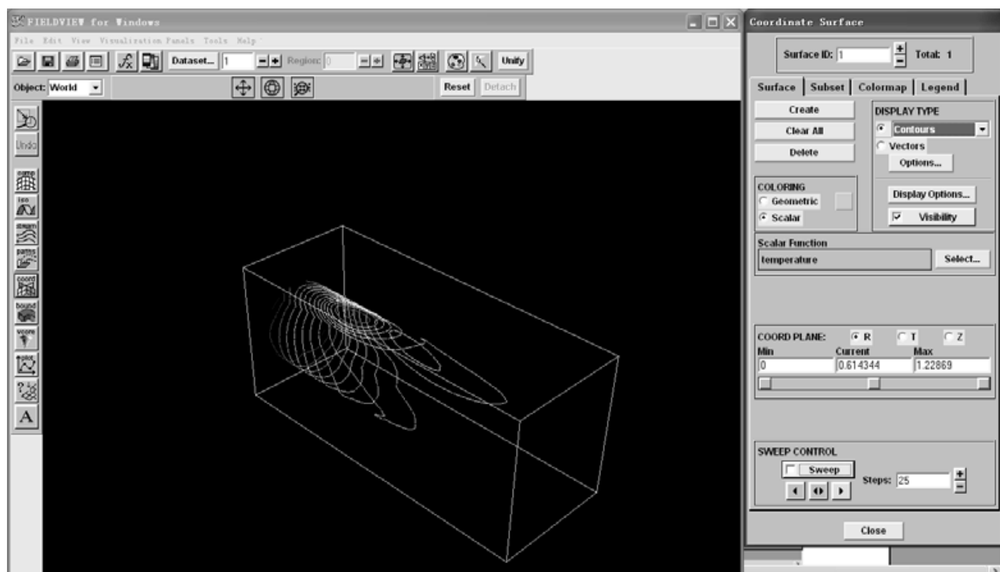


图 7−30　视图区中散热器圆周面的温度等值线

4）如图 7-31 所示，将“COORD PLANE”栏的“R”切换为“T”，可变为沿换热器中心线旋转的截面显示模式。通过滑块调节参数，可以选择不同角度对应截面上的温度云图。本例中的角度范围为 0°~360°。

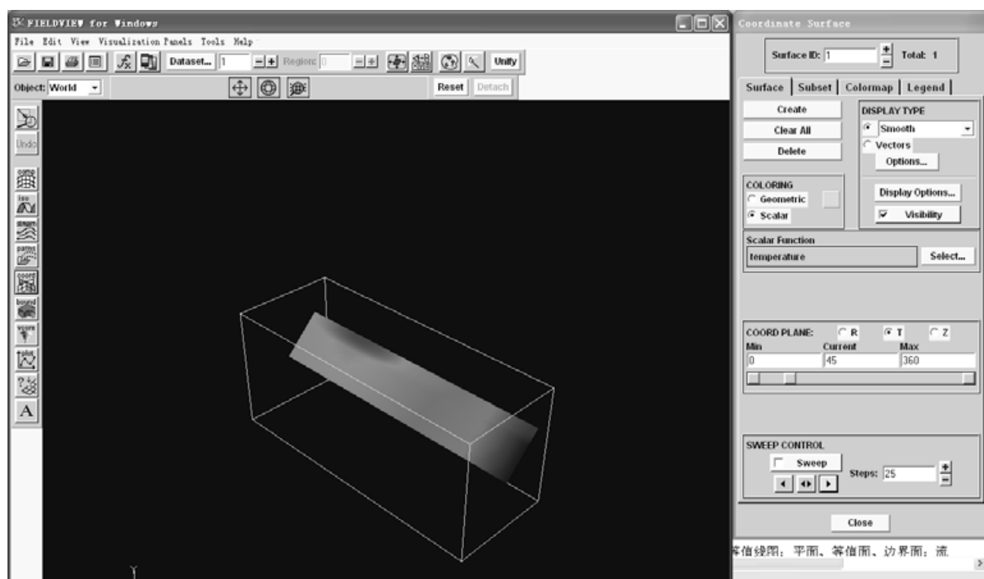


图 7-31　不同角度对应截面上的温度云图

5）如图 7-32 所示，将“COORD PLANE”栏的“T”切换为“Z”，可变为沿散热器中心线平移的法向截面温度云图。平移的范围为散热器 Z 向坐标的范围。通过滑块调节 Z 向参数，可以选择 Z 向坐标对应截面上的温度云图。

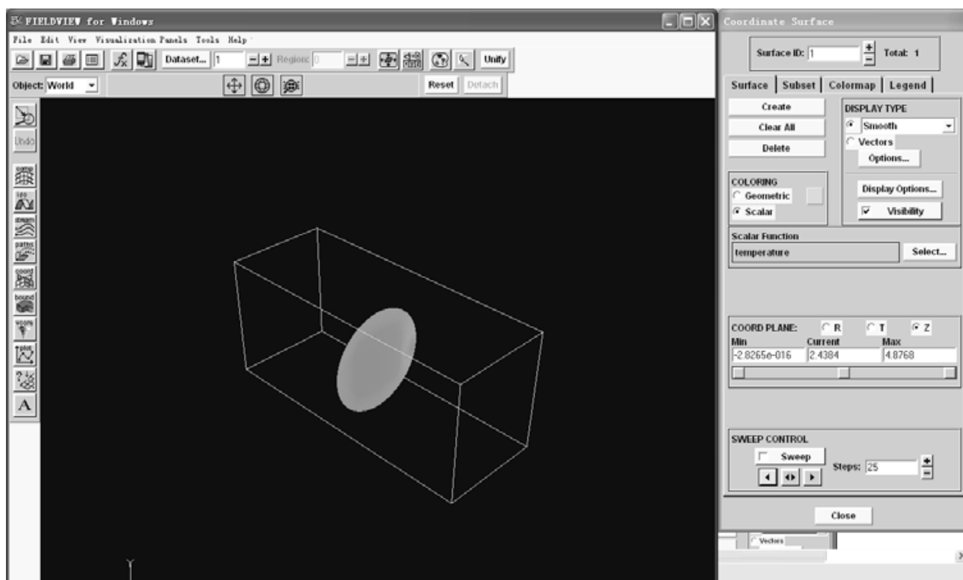


图 7-32　散热器中心线的法向截面温度云图

5．散热器内部温度动画显示

1）选择［Tools］>［Flipbook Build Mode］菜单命令，如图 7-33 所示，该项子菜单前自动加上一个勾号，表明 Flipbook 动画功能生效。同时，在“Coordinate Surface”对话框中，“SWEEP CONTROL”栏中的“Sweep”方式变为“Build”方式，如图 7-34 所示。

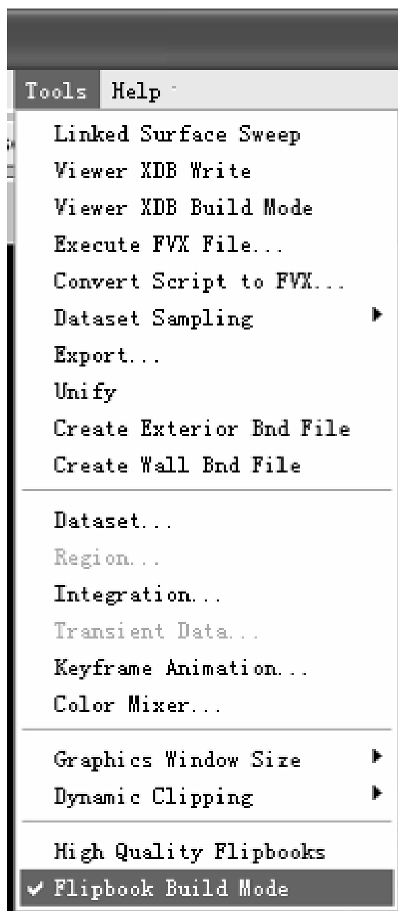


图 7-33　选择 Flipbook Build Mode 功能

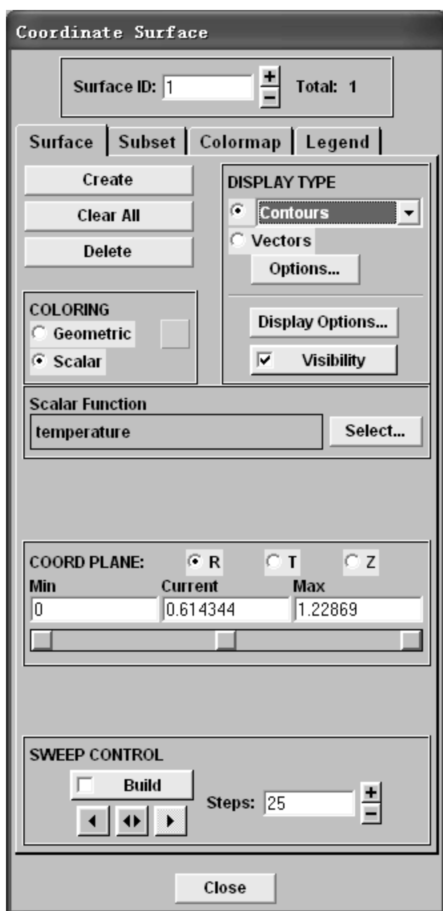


图 7-34　改变 SWEEP CONTROL

2）将“DISPLAY TYPE”栏换回为“Smooth”方式，选择“SWEEP CONTROL”栏中的“Build”选项，视图区会出现散热器内部不同半径圆周面的温度云图的变化（由于“Steps”项设置为 25 步，软件会分 25 个半径的圆周面，即分 25 帧显示散热器内部的温度云图，故该过程会持续几秒钟，如图 7-35 所示）。变化完成后，出现如图 7-36 所示的“Flipbook Control”对话框。

3）单击按钮，可重复以上动画；单击按钮，可随时停止动画显示；单击和按钮，可分帧显示动画。单击 Save... 按钮，可将动画保存为“.avi”格式的动画文件，如图 7-37 所示。

4）选择［File］>［Save Restart］>［Complete］菜单命令，可完全保存操作，如图 7-38 所示。文件被保存为“.dat”格式，如图 7-39 所示。该格式的文件可以在重启软件后再次打开。

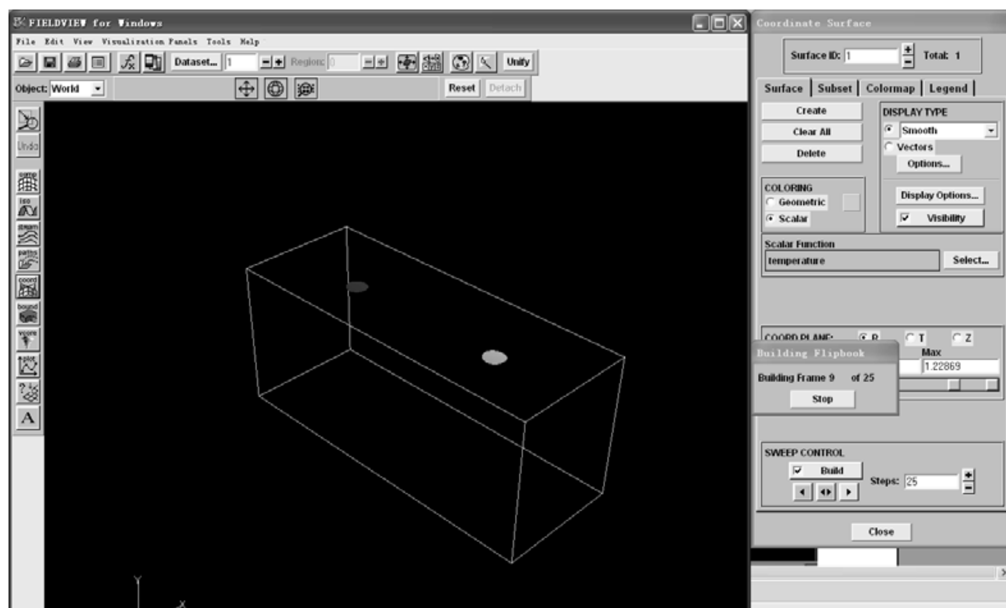


图 7-35 Flipbook 动画

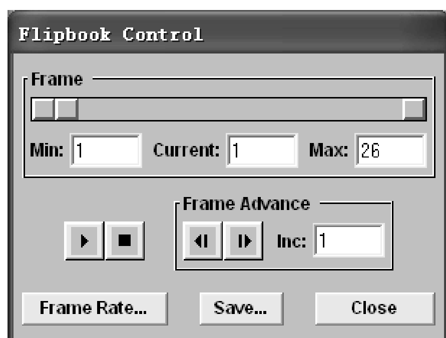


图 7-36 “Flipbook Control”对话框



图 7-37 保存动画文件



图 7-38 保存后处理文件

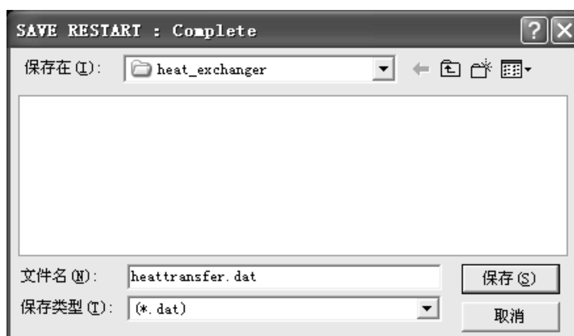


图 7-39 文件保存格式

7.1.5 F18 流场显示

1．导入 F18 流场计算文件

1）如图 7−40 所示，选择［File］>［Data Input］>［PLOT3D…］菜单命令，打开 F18 流场计算文件。弹出“PLOT3D”对话框，如图 7−41 所示。

2）在弹出的“PLOT3D”对话框中选中“DATA FORMAT”项下面的“IBlanks”和“Multi-Grid”两项，单击“Read XYZ Data…”按钮，如图 7−42 所示。

3）在“Read XYZ Data”对话框中，选择 F18 对称结构的“f18i9b_g_bin”文件，如图 7−43 所示。

4）在弹出的“Grid Subset Selection”对话框中保持默认设置，单击“OK”按钮，完成文件导入，如图 7−44 所示。

5）导入 F18 半机结构后的软件视图区如图 7−45 所示。

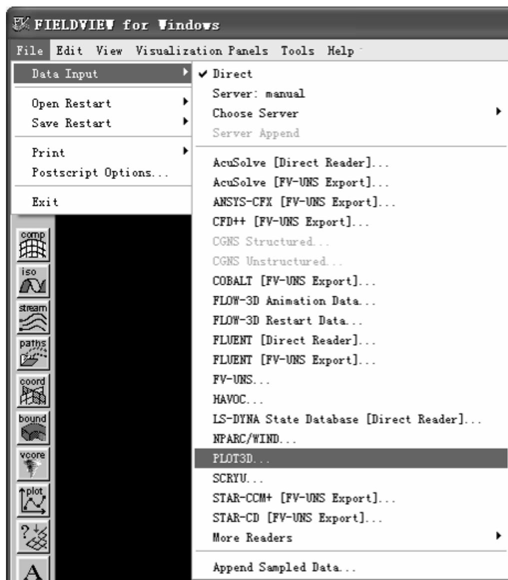


图 7−40　打开 F18 流场计算文件

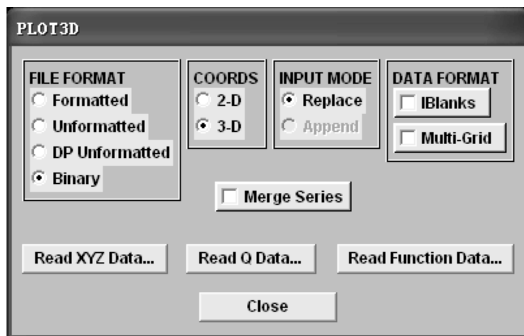


图 7−41　“PLOT3D”对话框

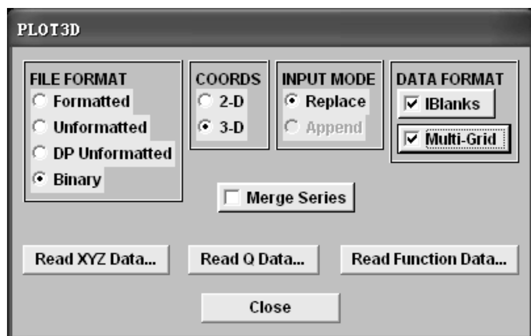


图 7−42　选中“IBlanks”和“Multi-Grid”两项

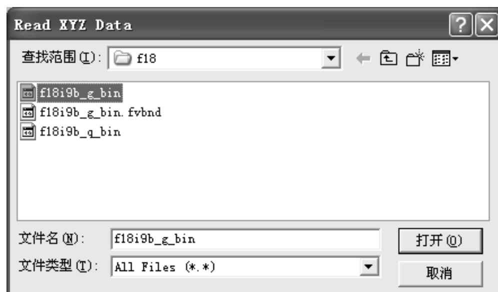


图 7−43　选择 F18 对称结构的“f18i9b_g_bin”文件

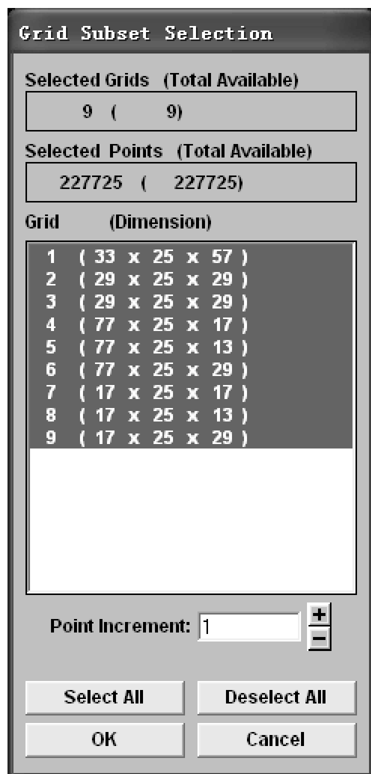


图 7-44 “Grid Subset Selection”对话框

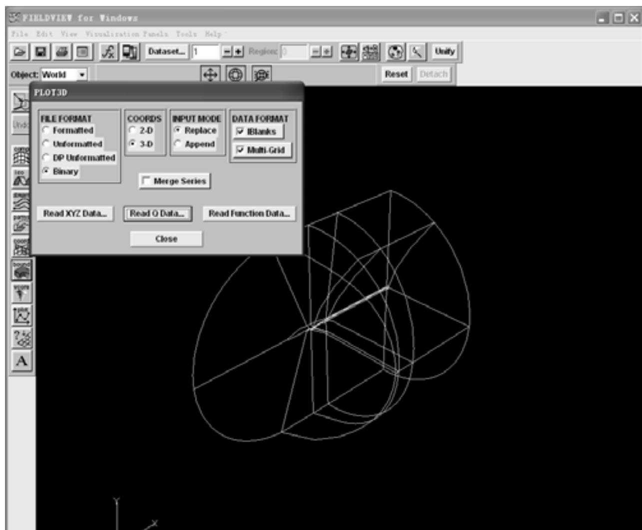


图 7-45 导入 F18 半机结构后的软件视图区

6）单击“PLOT3D”对话框中的按钮“Read Q Data…”，输入 F18 外流场计算结果文件“f18i9b_q_bin”，如图 7-46 所示。单击“Close”按钮，完成文件导入。

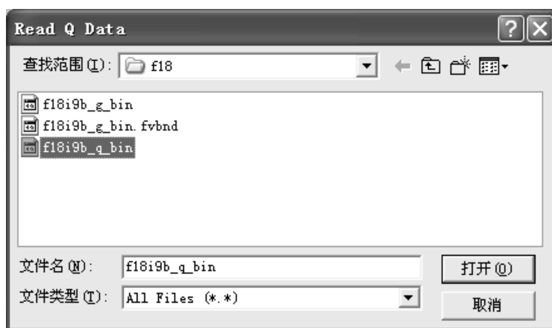


图 7-46 输入 F18 外流场计算结果文件

2．F18 整机显示

1）单击左侧的工具栏按钮，出现如图 7-47 所示的“Boundary Surface”对话框。单击 Tab 页“Surface”下的“Create”按钮，所有按钮生效；将“DISPLAY TYPE”栏中的“Mesh”项更换为“Smooth”项；单击“Select All”按钮，选择“BOUNDARY TYPES”栏中的所有边界，如图 7-47 所示。

2）单击“OK”按钮，视图区中的 F18 半机图如图 7-48 所示。

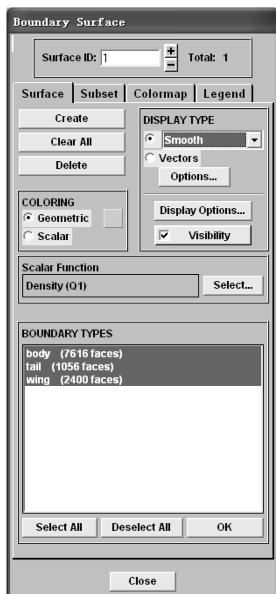


图 7-47　选择所有边界

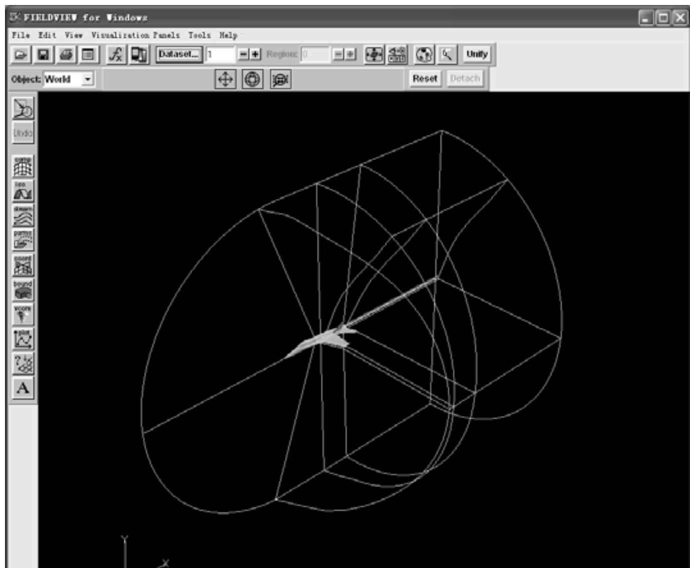


图 7-48　视图区中的 F18 半机图

3）取消选择［View］>［Perspective］（透视视图方式）和［View］>［Outline］（轮廓线方式）两种视图方式，如图 7-49 所示。

视图区中的轮廓线条被取消显示，只剩下半机身，如图 7-50 所示。

4）单击工具栏按钮 Dataset...，出现如图 7-51 所示的“Dataset Controls”对话框。选择“DUPLICATION”栏中的“Mirror”项，弹出如图 7-52 所示的“Mirror Parameters”对话框。在“Mirror Parameters”对话框中，将选中的“X”项改为“Z”项，改变镜像方向。

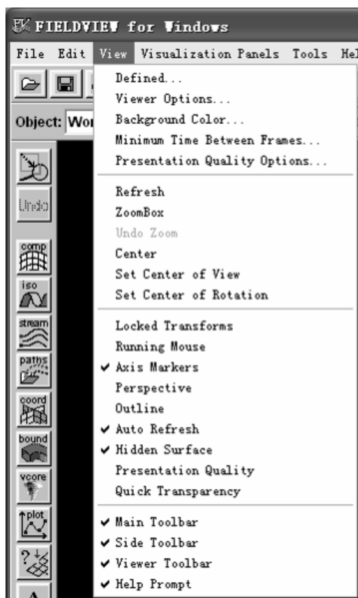


图 7-49　取消选择视图区 Perspective 和 Outline 项

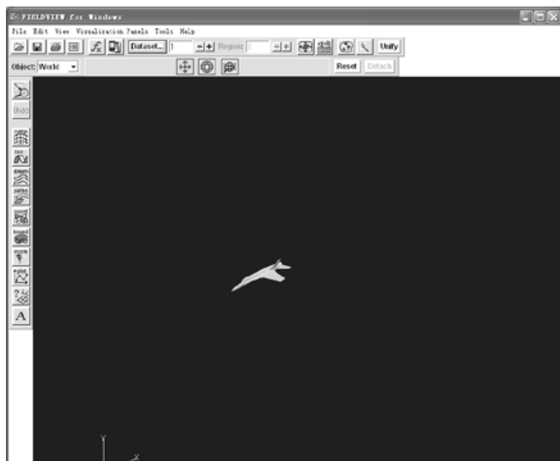


图 7-50　取消显示轮廓线条

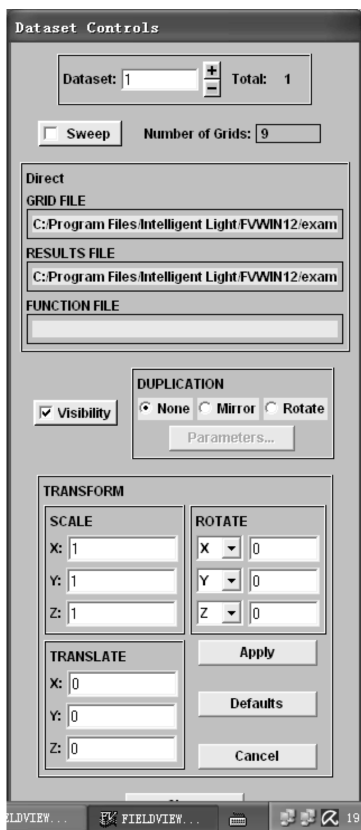


图 7-51 “Dataset Controls”对话框



图 7-52 改变镜像方向

5）单击“OK”按钮确认操作，视图区中的飞机整机图如图 7-53 所示。

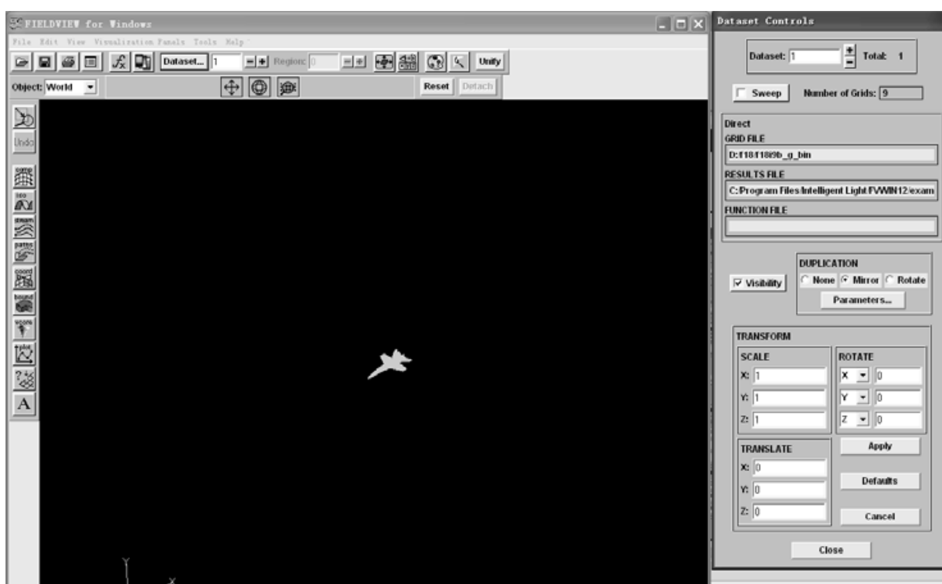


图 7-53 视图区中的飞机整机图

3．F18 流场显示

1）单击左侧的工具栏按钮，出现如图 7-54 所示的“Coordinate Surface”对话框。单击“Create”按钮，同时选择“COORD PLANE”栏中的“Z”项，并将“Current”项的值设置为 0.001。单击“COLORING”栏中“Geometric”项右侧的按钮，出现如图 7-55 所示的“Geometry Color”对话框。在“Geometry Color”对话框中，选择灰色作为背景颜色。

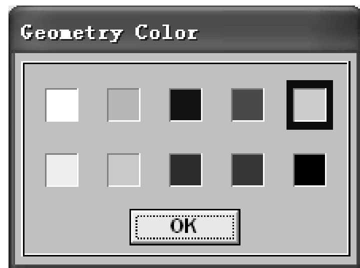


图 7-55　更换背景颜色

2）选择“DISPLAY TYPE”栏中的“Vectors”项，视图区变化为如图 7-56 所示的矢量场形式。

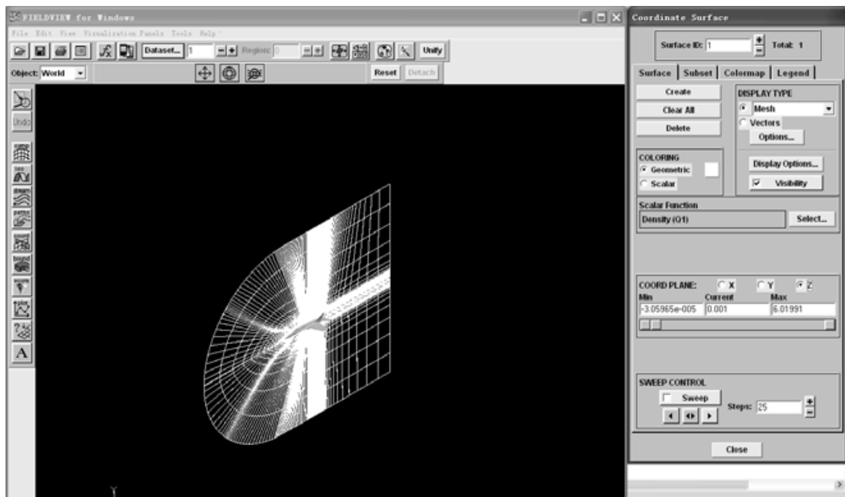


图 7-54　“Coordinate Surface”对话框

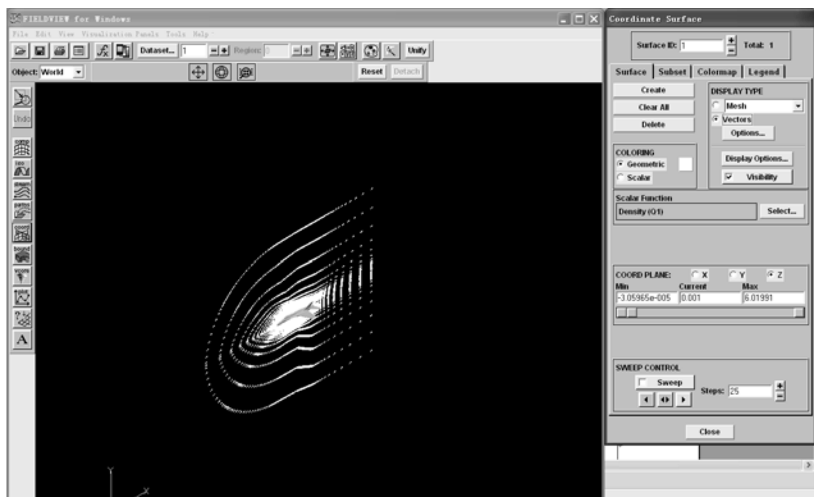


图 7-56　选择矢量场形式

3）选择“Coordinate Surface”对话框中的 Tab 页“Subset”项，调整流场矢量图。如图 7-57 所示，保持“SUBSET”栏中的“Increment”项为 1。

4）取消选择［View］>［Axis Markers］菜单命令，视图区的坐标轴取消，如图 7-58 所示。

5）通过调节滑块，调整“Subset”下“X CLIP”项和“Y CLIP”项的最小值 Min 和最大值 Max，确定视图区中 *X* 向和 *Y* 向坐标的取值范围。坐标范围调整后的矢量场如图 7-59 所示。

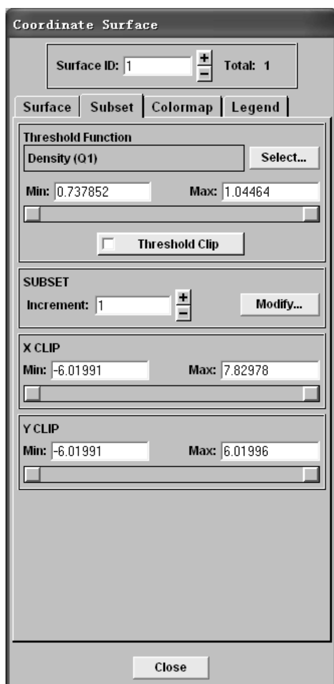


图 7-57　调整流场矢量图

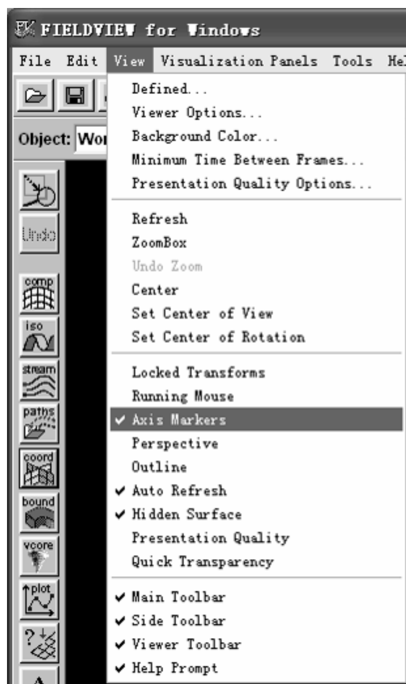


图 7-58　取消视图区的坐标轴

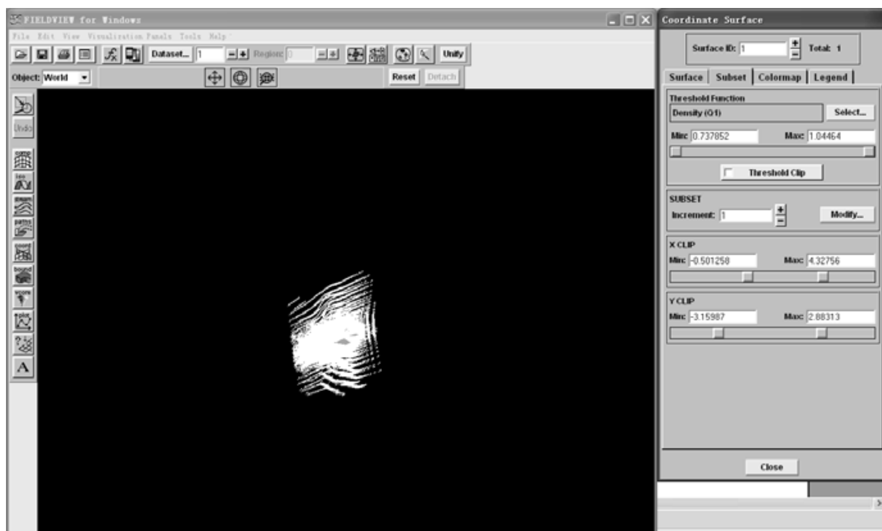


图 7-59　坐标范围调整后的矢量场



6）如图 7-60 所示，选择［View］>［Defined…］菜单命令，定义视图方式。在弹出的“Defined Views”对话框中，单击“VIEWING DIRECTION”栏中的“+Z”按钮，如图 7-61 所示。

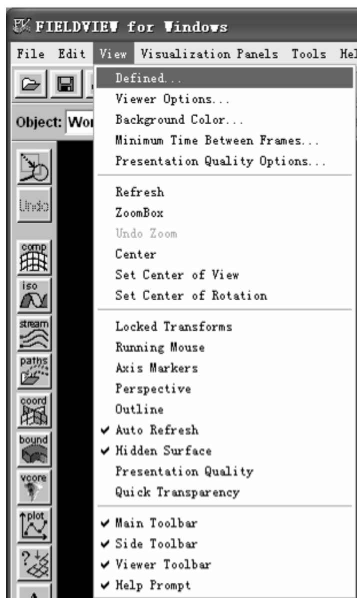


图 7-60　定义视图方式

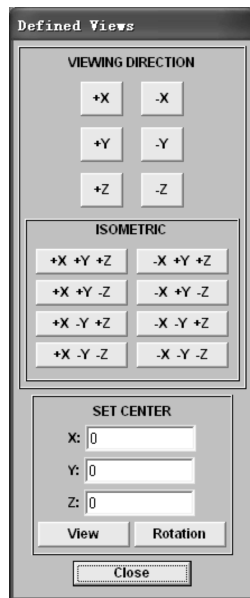


图 7-61 “Defined Views”对话框

7）用鼠标右键放大显示飞机周围的流场，放大后的矢量场如图 7-62 所示。

8）单击 Tab 页“Surface”项中“Vector”项下的“Options…”按钮，弹出如图 7-63 所示的“Vector Options”对话框。

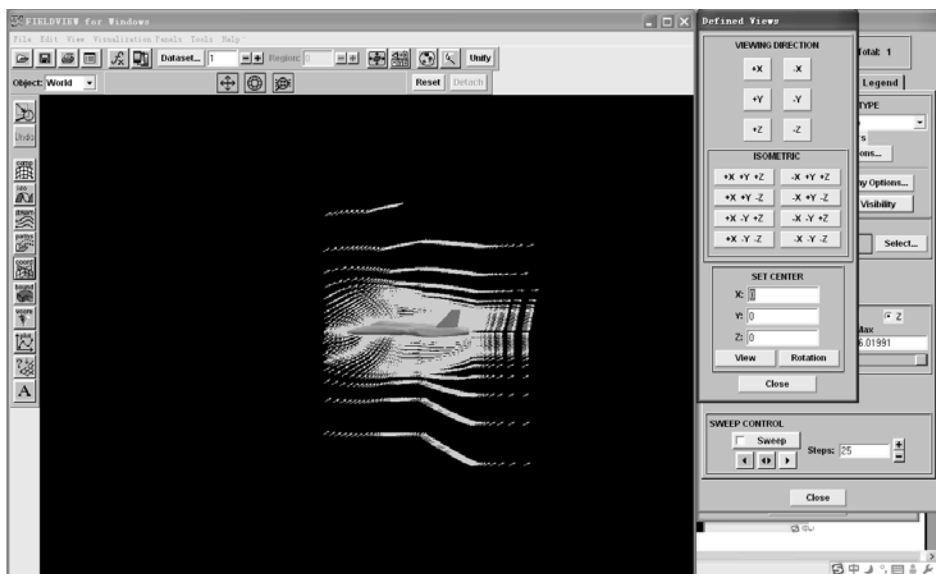


图 7-62　放大后的矢量场

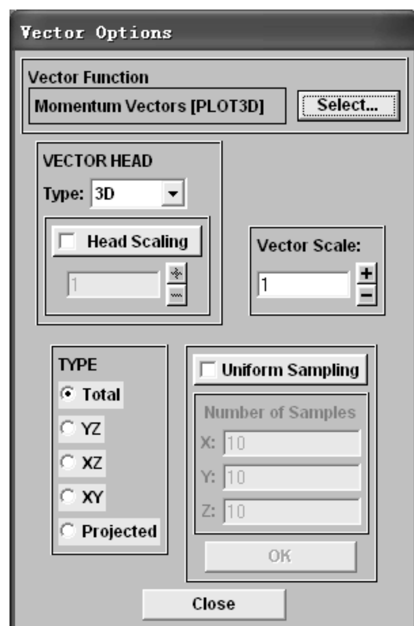


图 7-63 “Vector Options”对话框

9）在“Vector Options”对话框中选中“Uniform Sampling”项，视图区流场速度矢量图如图 7-64 所示。在右侧“Vector Options”对话框中的“Number of Samples”项中，X、Y、Z 3 个方向上的矢量图标均为 10 个，调节这些值可以调节矢量图的疏密。

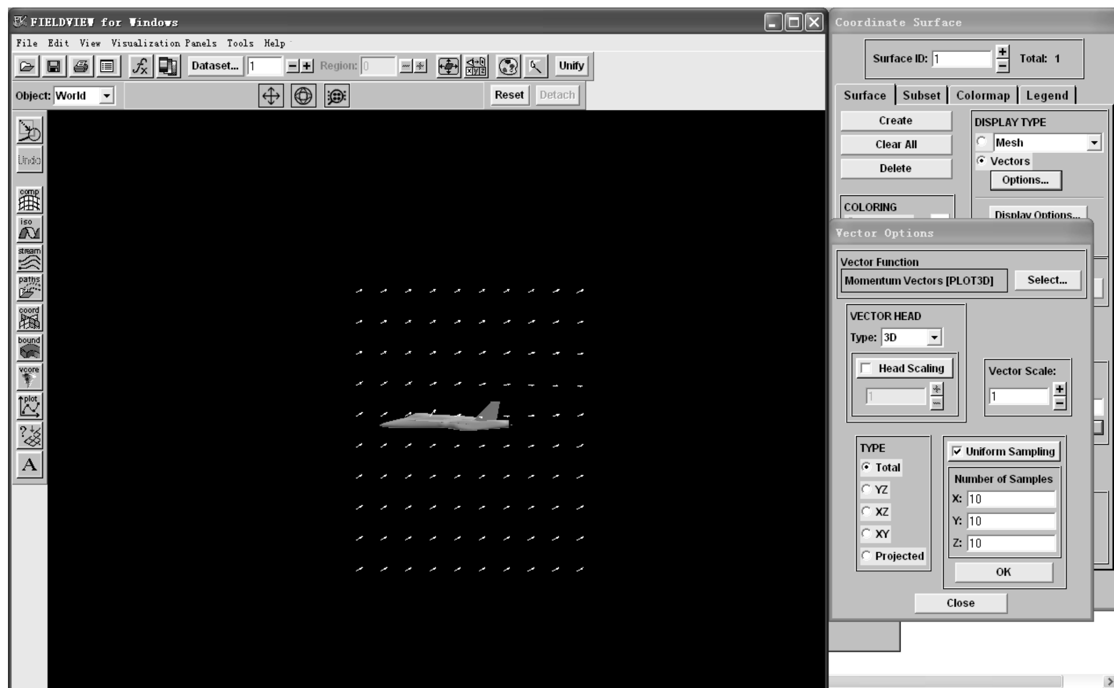


图 7-64 视图区流场速度矢量图

10）单击“Vector Options”对话框中的“Select…”按钮，弹出如图 7-65 所示的“Function Selection”对话框。选择第一项“Velocity Vectors（PLOT3D）”，单击“Calculate”按钮进行矢量场的绘制。

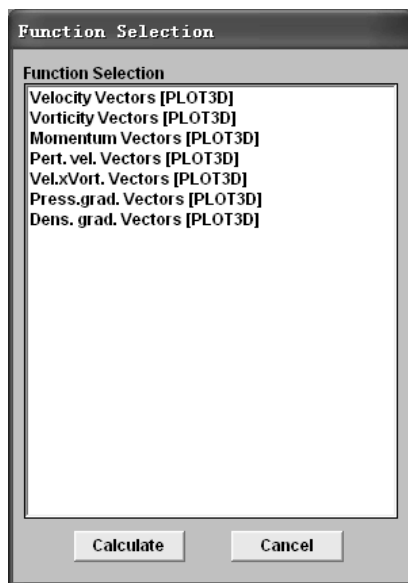


图 7-65 “Function Selection”对话框

11）将“Vector Options”对话框“VECTOR HEAD”栏中的“Type”项设置为“2D”，选择“Head Scaling”项并设置为 2，同时将“Length Scale”项设置为 4（可视计算机的分辨率调节大小），单击“OK”按钮，调整后的视图区矢量场如图 7-66 所示。

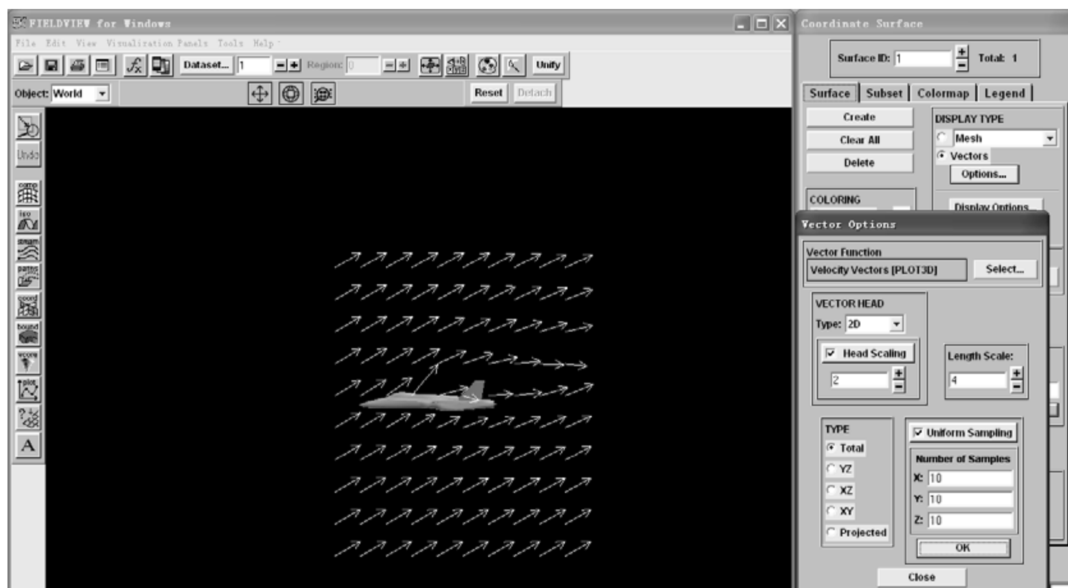


图 7-66 调整后的视图区矢量场

12）单击 Tab 页“Surface”项中“DISPLAY TYPE”栏中的“Display Options…”按钮，弹出如图 7-67 所示的“Display Options”对话框。将“LINE TYPE”栏中的“Thin”改为“Medium”，箭头加粗后的矢量场如图 7-68 所示。

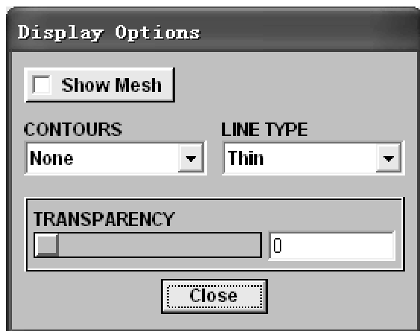


图 7-67 “Display Options”对话框

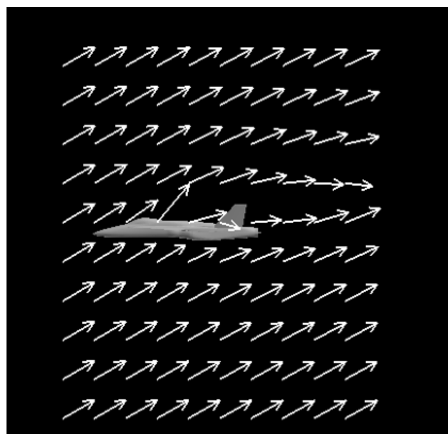


图 7-68 箭头加粗后的矢量场

13）选择［File］>［Save Restart］>［Complete］菜单命令，完全保存操作。文件被保存为“f18.dat”，如图 7-69 所示。

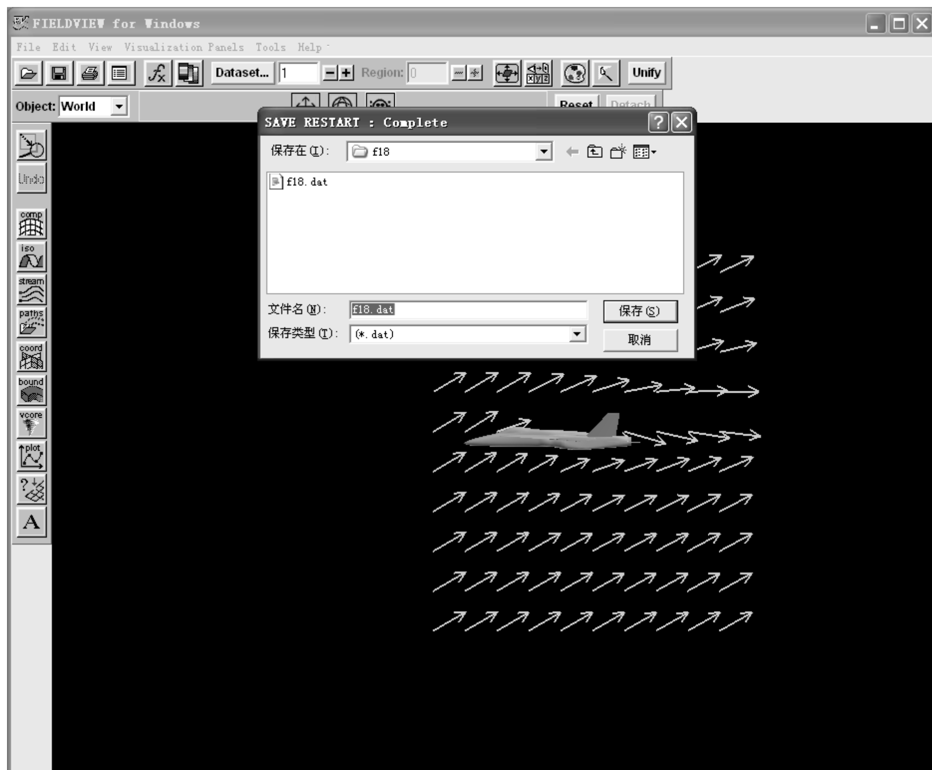


图 7-69 保存文件

7.2　TECPLOT 软件介绍及实例操作

TECPLOT 是 Amtec 公司推出的一款功能强大的科学绘图软件。它提供从简单的 XY 图到复杂的 3D 动态模拟的多种图表格式，表现方式有等高线、3D 流线、网格、矢量、剖面、切片、阴影、上色、数据表及动画等。TECPLOT 可进行科学计算，将经过 FLUENT 处理的计算文件进行视觉化处理。TECPLOT 可用来建立一个图形，二维数据的等高线和矢量图块，且定位方便。每个图形均在一个框架中，这些框架可以被复制再修改，这会使用户很容易地对一个数据集显示出不同的视图。TECPLOT 的主要功能包括：可直接读入常见的网格、CAD 图形及 CFD 软件（PHOENICS、FLUENT、STAR-CD）生成的文件，能直接导入 CGNS、DXF、EXCEL、GRIDGEN、PLOT3D 格式的文件，能导出的文件格式包括了 BMP、AVI、FLASH、JPEG 和 WINDOWS 等常用格式，可在 Windows 9x\Me\NT\2000\XP 和 UNIX 操作系统上运行。文件能在不同的操作平台上相互交换，利用鼠标直接单击即可知道流场中任一点的数值，能随意增加和删除指定的等值线（面）。TECPLOT 10.0 软件的主界面如图 7-70 所示，本章将以该软件的基本功能和使用案例为例，介绍 TECPLOT 10.0 软件。

7.2.1　TECPLOT 菜单栏

TECPLOT 软件的菜单栏包括 File、Edit、View、Plot、Inset、Data、Frame、Workspace、Tools 和 Help10 项。

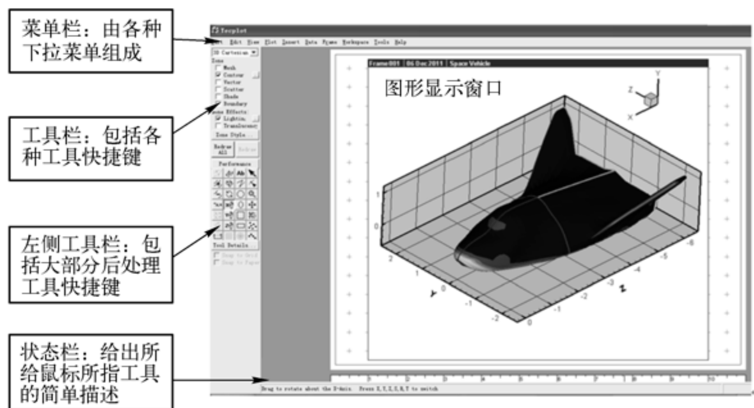


图 7-70　TECPLOT 10.0 软件的主界面

1．File 菜单

File 菜单的主界面如图 7-71 所示。其中，“New Layout”用于删除现有的文本框，以备重新调入一个 TECPLOT 图；“Open Layout”表示弹出对话框，可以在确切的路径下恢复一个先前曾保存过的图文件；“Save Layout as”表示以一个新的文件名来存储先前曾保存过的图形；“Load Data File(s)”主要是读取文件夹里各种类型的模型，如 3D 和 2D 等。

2．Edit 菜单

Edit 菜单的主界面如图 7-72 所示。其中，“Select All”用于在弹出的对话框中为选择框、图域、文本、几何和线条等提供选择；“Push”用于将已选择的项目放到当前图片堆的底部，TECPLOT 图用于把图片从底部到顶部的图块依次显示于软件界面上，如文本、几何体、二维或 xy 网格和文本框这几种类型都有可能被放进栈内；“Pop”用于把现有图片堆中的已选项从堆中取出，而文本、几何体、二维图形或 xy 网格域、文本框可能被弹出；“Copy Layout to Clipboard”用于把当前的图案复制到剪贴板上。

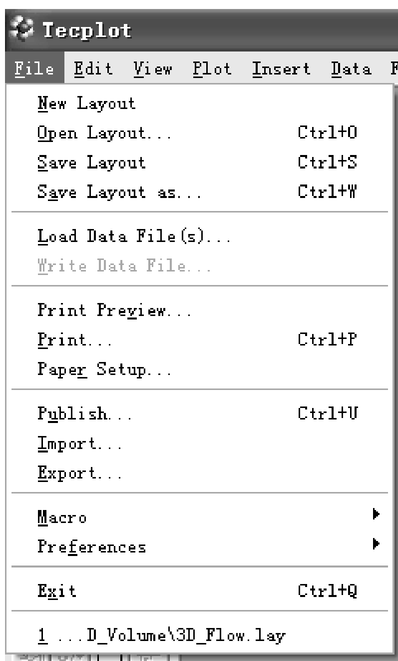


图 7-71 File 菜单的主界面

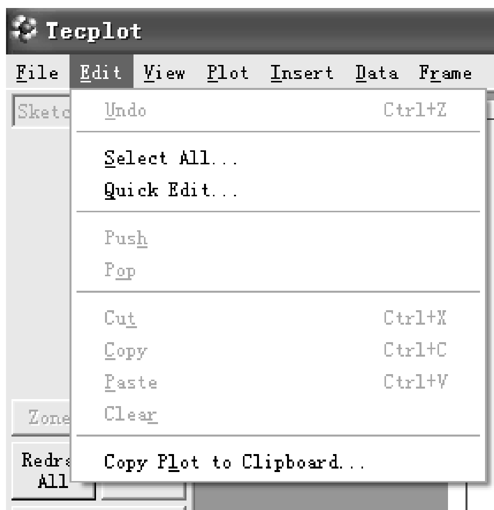


图 7-72 Edit 菜单的主界面

3．View 菜单

View 菜单的主界面如图 7-73 所示。其中，“Redraw”用于刷新当前的图片框，以显示出所有的那些悬而未决的变化；“Zoom”用于对图形进行交互的缩放；“Nice Fit to Full Size”用于放大图形，使之填满整个图片框；“Center”可将文本框的图形置于中心位置；“Last”用于恢复 TECPLOT 视图栈中先前的一个视图。

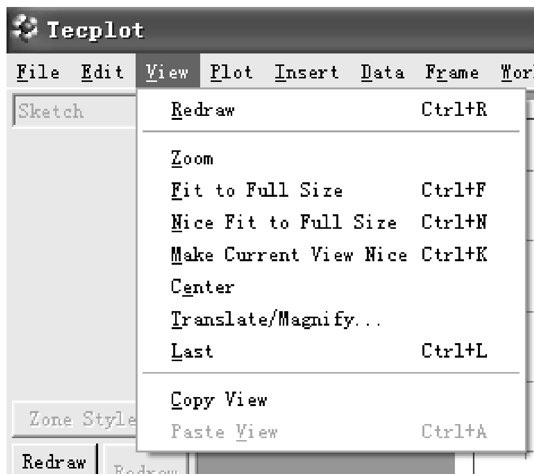


图 7-73 View 菜单的主界面

4．Plot 菜单

Plot 菜单的主界面如图 7-74 所示。使用绘图工具控制图形的类型，绘



图工具可以单独激活图形类型（在工具栏内选择），运用此菜单可以控制 *XY* 图、二维、三维图形的轴线情况。其中，“Edit”用于在弹出的对话框中设置 *X*、*Y*、*Z* 轴的显示与陈列情况，它主要包括两个区域：“Axis”可以控制 *X*、*Y*、*Z* 轴的具体显示，它包括的按钮选项为“Title”主要显示坐标轴标题，“Range”用于调整各坐标轴变量的范围，“Grid”主要控制网格线的显示及其显示时网格线的特征，“Ticks”主要是设置标尺的显示及其显示方式，“Label”用于设置标尺标签的显示，“Line”可设置各轴线的显示及轴线的颜色和厚度等项，“Area”主要控制网格区域的格式，包括网格域的填充和网格边界线的属性等功能，如图 7-75 所示。“Assign XYZ”用于对每个变量选择一个合适的参数，实现在三维图中轴线位置关系的变化；“3D Orientation Axis”用于设置三维方向轴的显示，或者显示的颜色、尺寸大小和显示位置等各参数。

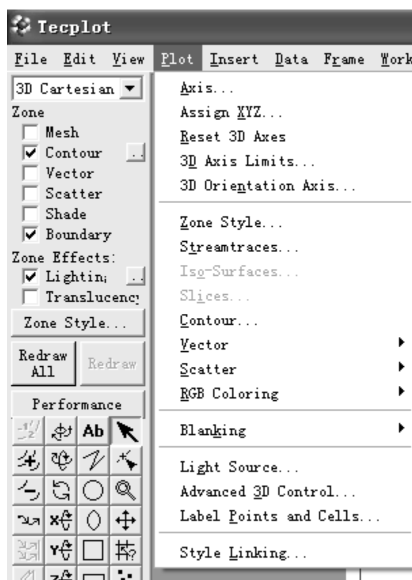


图 7-74　Plot 菜单的主界面

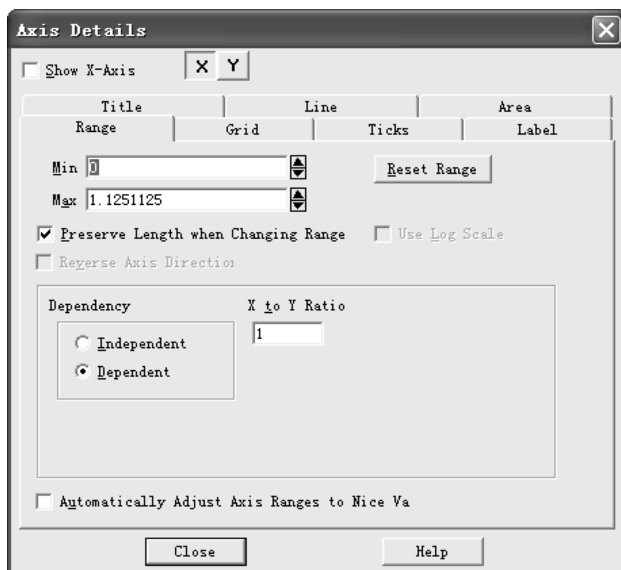


图 7-75　Axis 子菜单

5．Insert 菜单

Insert 菜单的主界面如图 7-76 所示。利用 Insert 菜单可以绘制不同形状的二维图，并且可以在工作区进行文字编辑。Insert 菜单主要包括以下几种功能：“Text”可以在工作区编辑文字；“Polyline”用于创建直线并对其进行编辑；“Circle”用于创建圆并对其进行编辑；“Image”可以从外部读入其他格式的文件（如.bmp 和.png 等）。

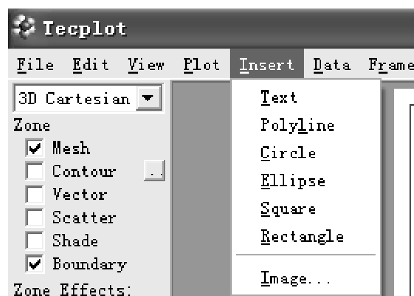


图 7-76　Insert 菜单的主界面

6．Data 菜单

Data 菜单可用于创建、操作和检查数据，如创建简单区域、插值和三角形部分，以及用类似 FORTRAN 的语句创建和修改变量，如图 7-77 所示。Data 菜单下的主要菜单项及功

能如下：

1）Alter：主要用于转换其原始数据，如图 7-78 所示，单击“Specify Equations”项，可以打开如图 7-79 所示的“Specify Equations”对话框，为当前的数据设置、建立和修改一些变量值。对话框主要分 3 个部分，顶部用来规定方程式，中间区域用来规定该修饰哪一个区域或索引范围，最后一部分是用来执行计算、关闭窗口、获得帮助的按钮域；“Smooth”用于将二维、三维图中的变量值修饰平滑；“2D Rotate”用于对二维图的 *X*、*Y* 轴进行旋转。

2）Create Zone：用于创建新区域以及数据的设置，如图 7-80 所示，其中，“1D-Line”根据所规定点的数目和具体范围来建立一个序的区域；“Rectangular”用规定的尺寸建立一个矩形区域；“Circular”用规定的尺寸和一个具体的网格点的数目建立一个圆形区域；“Duplicate”用于建立一个已存区域的复制域；“Mirror”用于建立一个新的域作为已存区域的镜像。

3）Extract：可以从当前数据集中挑选数据，如图 7-81 所示。“FE Boundary”用于抽取限定区域的边界线；“Slice”用于抽取一个三维图数据集的二维空间的片段。

4）Interpolate：对每个 TECPLOT 图的插补方法选项，如图 7-82 所示。“Linear”借用线性内插法的对话框，可把数据从一个或多个源区域插入到一个目标区域中。

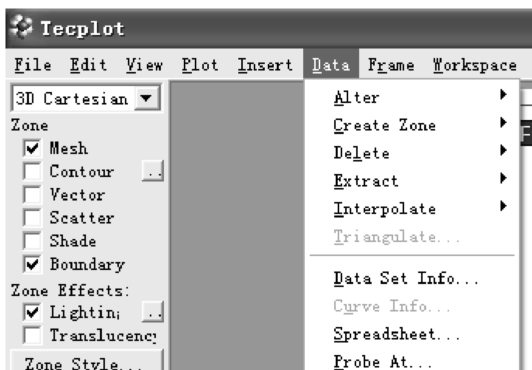


图 7-77　Data 菜单的主界面

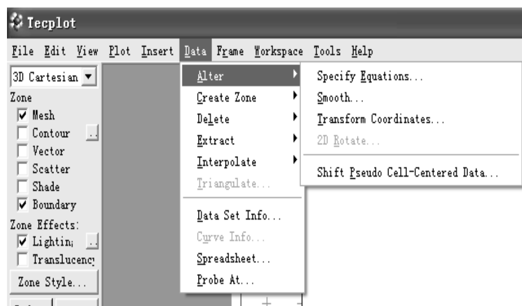


图 7-78　Alter 子菜单

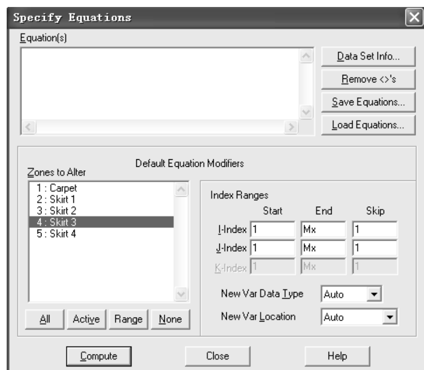


图 7-79 “Specify Equations”对话框

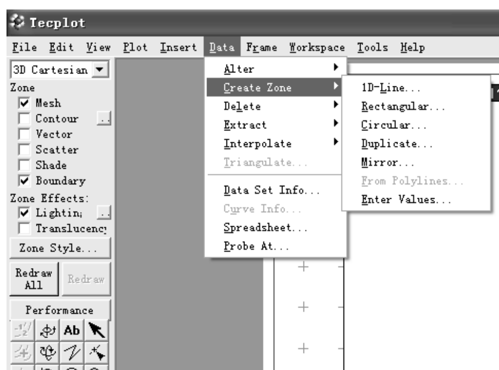


图 7-80　Ceate Zone 子菜单

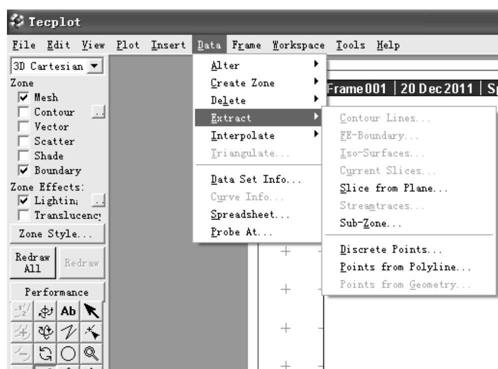


图 7-81　Extract 子菜单

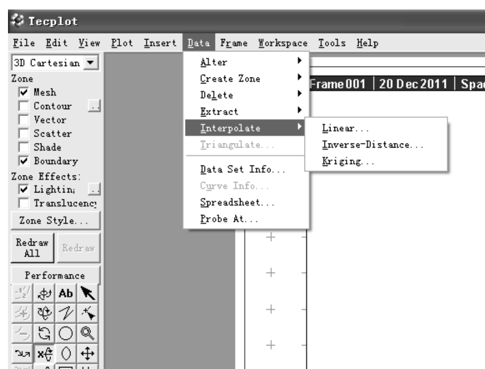


图 7-82　Interpolate 子菜单

7．Frame 菜单

Frame 菜单主要用于在图表中控制文本、几何体（圆形、椭圆、正方形、矩形），数据标签，空格等功能，还可以复制、粘贴风格表单文件，如图 7-83 所示。“Create New Frame”用于在工作区内创建数据标签；“Edit Current Frame”用于精确控制框架的大小、位置和格式等属性；“Delete Current Frame”用于删除当前的文本框；“Push Current Frame Back”用于把当前框推到框堆栈的底部；“Fit all Frames to Paper”用于修改所有的文本框，以与当前纸的尺寸大小相匹配；“Copy Frame Style to File”用于复制当前框架中的一些风格元素，如文本、几何体和轴线等；“Paste Frame Style From File”用于恢复当前保存过的风格文件到当前框中。

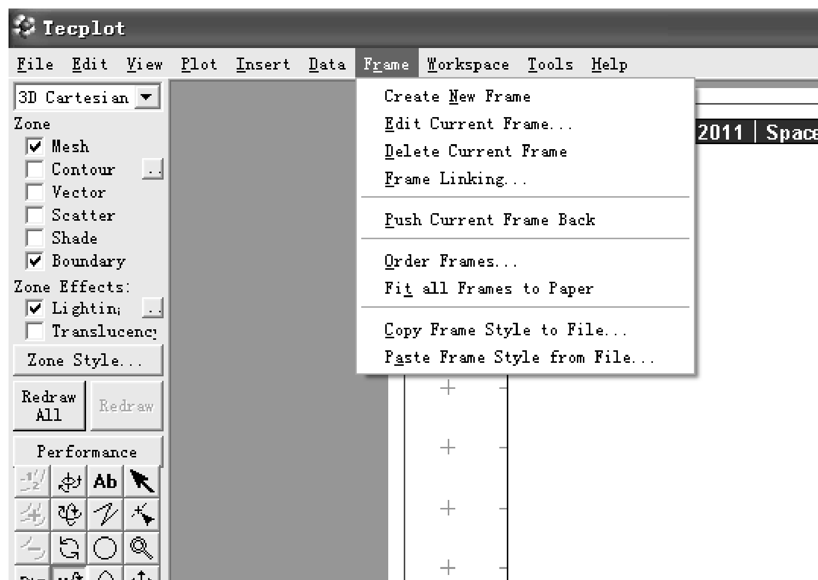


图 7-83　Frame 菜单的主界面

8．Workspace 菜单

Workspace 菜单用于控制 TECPLOT 绘图空间的显示，包括显示网格与标尺、色彩地图

的规范、文本框与工作空间的匹配、工作空间视图的控制，如图 7-84 所示。其中，“Ruler/Grid”用于控制标尺和网格是否显示以及怎样显示；“Color Map”用于控制 TECPLOT 的彩色地图，可以控制彩色地图等高线图块或多彩网格、分散图或矢量图内的颜色；“Fit all Frames to Workspace”用于修改所有的文本框，用以使被选框可以在一维空间上，或水平或垂直地填满整个工作空间；“Maximize Workspace”通过控制 TECPLOT 的菜单栏和工具栏来尽可能地扩大工作空间的尺寸大小。

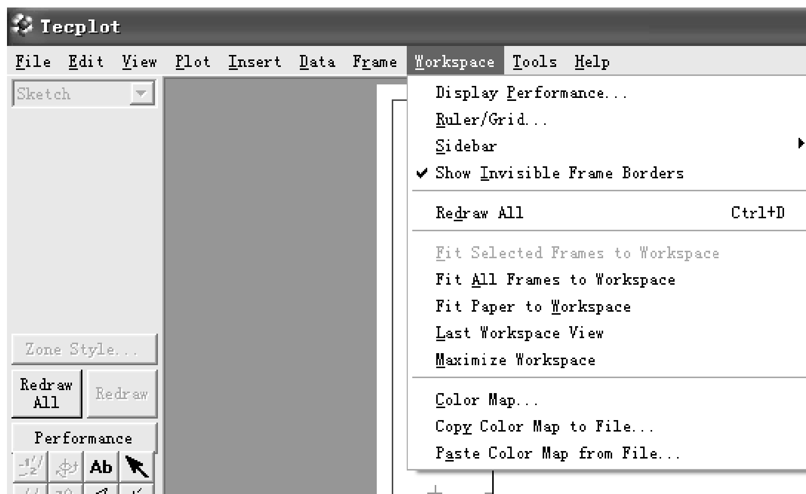


图 7-84 Workspace 菜单的主界面

9．Tools 菜单

运用工具菜单栏下的选项，可以打开快捷宏面板，快速进入曾定义过的快捷宏面板，也可进入 TECPLOT 的活动菜单。TECPLOT 允许激活一些区域、一维图形和等高线水平等，如图 7-85 所示。通过“Quick Macro Panel”可以进入曾定义过的快捷宏面板。一个快捷宏是定义在文件 TECPLOT.mcr 里的任何一个宏的功能。启动 TECPLOT 时，会在 TECPLOT 主目录中寻找 TECPLOT.mcr 文件。若文件存在，定义在那个文件上的宏功能的名字会显示在快宏板的键按钮上；“Animate”包括一些激活 TECPLOT 数据的选项；“Zones”可一次在一个区域里查看数据，用于显示在当前数据集中所有的或某一规定区域的子集，一次显示一个。规定一个开始域、一个尾域和域的跳跃步伐在活动序列中的运用，“XY Mapping”一次查看一个数据，可以设置一个开始图和一个末尾图，还有在活动序列中图的跳跃步伐，“Contour Levels”用于在等高线水平上一次性查找一个等高线图块。

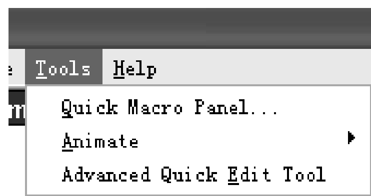


图 7-85 Tools 菜单的主界面

10．Help 菜单

Help 菜单包括软件自带的帮助内容和帮助使用说明，并可进行相关查询。Help 菜单的主界面如图 7-86 所示。


图 7-86 Help 菜单的主界面

7.2.2 TECPLOT 左侧工具栏

TECPLOT 工具栏如图 7-87 所示，它将常用的画图控制用的按钮集中在工具栏中，同时还可以选择帧模式、激活图形层和采用快照模式。



图 7-87 TECPLOT 工具栏

1）帧模式：帧模式即当前帧内所绘制图形的类型，如图 7-88 所示。其中，“3D Cartesian”用于绘制三维面或者体；“2D Cartesian”用于绘制二维图形；“XY Line”用于绘制 XY 曲线，即常见的函数关系曲线；“Sketch”用于在没有数据的情况下随意绘制的图形，如草图和流程图等。图形是由帧模式、数据集、活动图形层及其属性定义构成的，每个帧模式都只能显示数据的一种特性。

图 7-88 帧模式菜单

2）区域/图形层：区域层（Zone Layer）是表达数据集合的一种方式。完整的图形应包括所有被激活的层、坐标轴、文本、几何对象和在绘图期间加入的其他图形元素。

在二维和三维模式下共有 6 种区域层，如图 7-89 所示。“Mesh”用于网格层，用线连接数据点；“Contour”用于等值线层，可以用曲线形式或填充形式绘制等值线，也可以同时采用等值线和填充方式进行绘制；“Vector”用于矢量层，绘制带方向和大小的矢量图形；“Scatter”用于散点层，在每一个数据点的位置上绘制符号；“Shade”用于阴影层，可以为指定区域加阴影，或用添加光源的方式为三维曲线添加阴影，与光照（Lighting）效果配合使用，可以制作平面阴影或交错阴影；与透明（Translucency）效果配合使用，可以创建透明曲面；“Boundary”用于边界区域，为有序数据集合绘制区域边界。

XY 模式下的 4 种图形层如图 7-90 所示。“Lines”用线段或拟合曲线形式绘制变量（X、Y）的函数关系曲线；“Symbols”用散点形式表达变量（X、Y）的函数关系；“Bars”用水平或垂直柱状图形式表达变量（X、Y）的函数关系；“Error Bar”可用几种格式绘制误差柱状图。

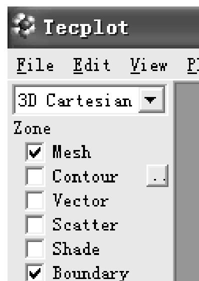


图 7-89　二维和三维模式下的区域/图形

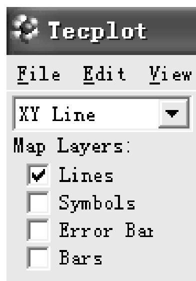


图 7-90　XY 模式下的 4 种图形层

3）区域效果（Zone Effects）：在三维帧模式下会出现如图 7-91 所示的区域效果选择图。注意，选择框内的 Lighting（光照效果）和 Translucency（透明效果）只对着色和带阴影效果的等值面起作用。

4）重画按钮（Redraw Button）：重画按钮图如图 7-92 所示。单击“Redraw（重画）”按钮重画当前帧，单击“Redraw All（全部重画）”按钮，重画全部帧：按下〈Shift〉键，同时单击“Redraw All”按钮，将重新生成工作区。



图 7-91　区域效果选择图

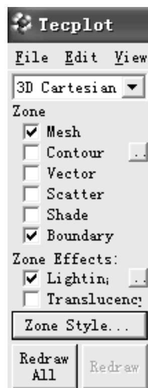


图 7-92　重画按钮图

5）绘图属性按钮：每个工具按钮对应一种鼠标操作，共有 28 种操作，如图 7−93 所示，可以归纳为 12 类，即等值线模式、流线模式、切片模式、帧模式、创建域模式、三维旋转模式、文字模式、几何形状模式、鼠标模式（选择、调整）、视图模式（缩放、平移/放大）、鼠标探测模式和数据提炼模式。

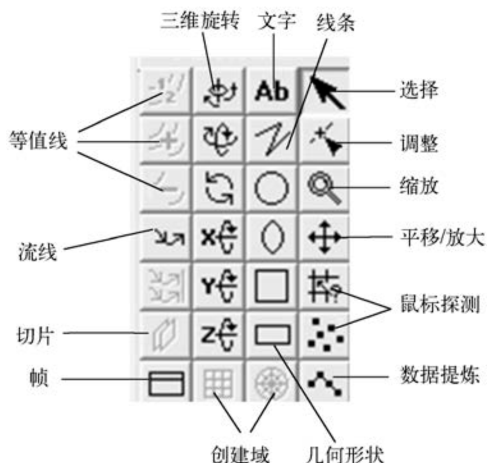


图 7−93　绘图属性按钮

7.2.3 计算后处理

1．创建三维（3D）等高线

1）单击［File］>［New Layout］，选择［File］>［Load Data File（s）］菜单命令，在 TECPLOT 的安装目录 TEC100 下选择［Demo］>［3D］>［skirt.plt］，导入文件，如图 7−94 所示。

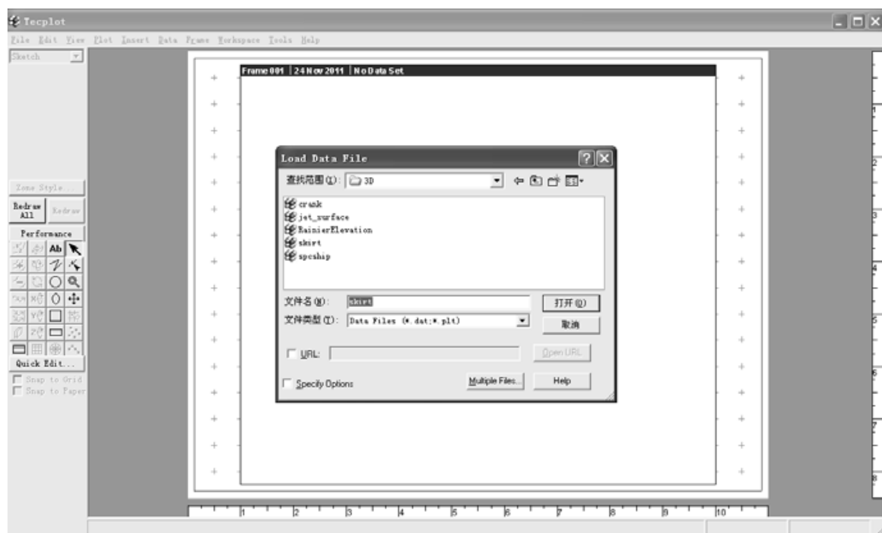


图 7−94　选择“Load Data File”

2）单击“打开”按钮，弹出“Select Initial Plot”对话框，选择“3D Cartesian”，如图 7-95 所示。单击“OK”按钮确认操作。

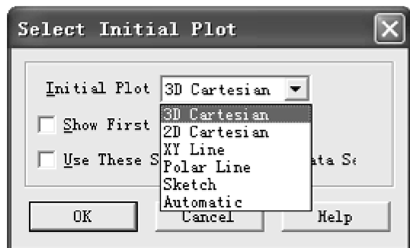


图 7-95 选择 3D Cartesian

3）在界面左侧的工具按钮栏中单击“定 Z 轴旋转”按钮（左起第二列倒数第二个按钮），用鼠标单击图像将其拖动旋转 180°，使图像面向读者。

4）在 “Zone”标题栏中，选中“Contour”，取消勾选 Mesh，在弹出的“Contour Details”对话框中的“Var”项中选择变量“P（N）”，如图 7-96 所示。单击“Close”按钮退出。

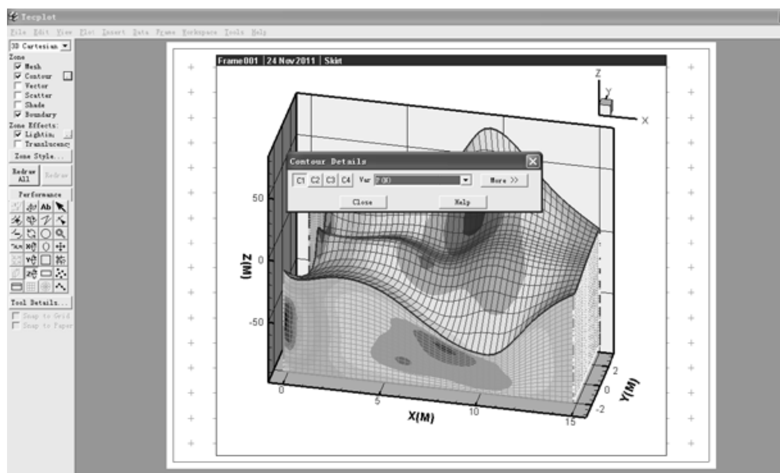


图 7-96 Contour Details 设置

5）单击左侧工具栏中的“Zone Style”按钮，在弹出的对话框中选择“Boundary”项，选择所有区域。单击“Bndy Color”按钮，弹出“Select Color”对话框，选择黑色，如图 7-97 所示。

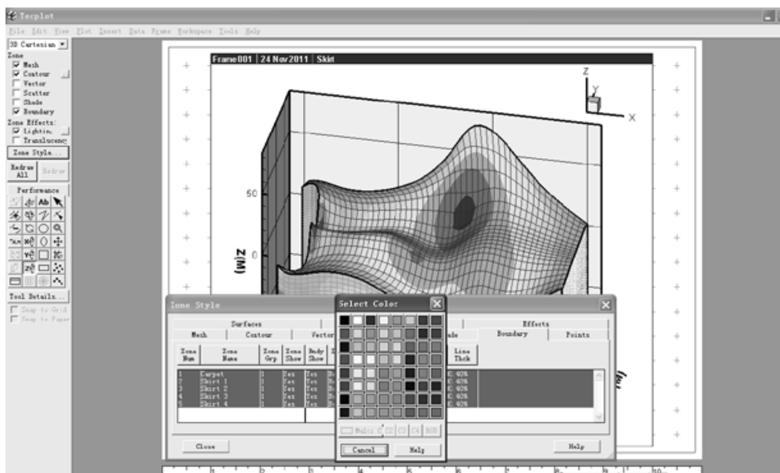


图 7-97 Zone Style Boundary 设置

6）单击左侧工具栏中的“Zone Style”按钮，在弹出的对话框中选择“Effects”选项卡，选中下面所有的区域，将“Lighting Effect”设置为“Gouraud”，如图 7-98 所示，最终的显示结果如图 7-99 所示。单击“Close”按钮退出。

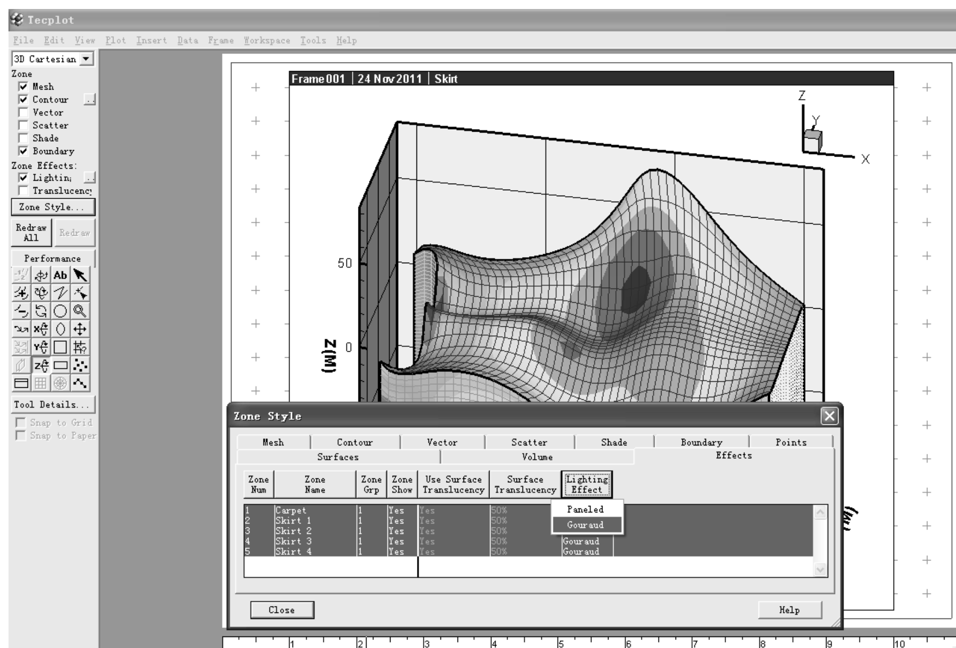


图 7-98　Zone Style Lighting Effect 设置

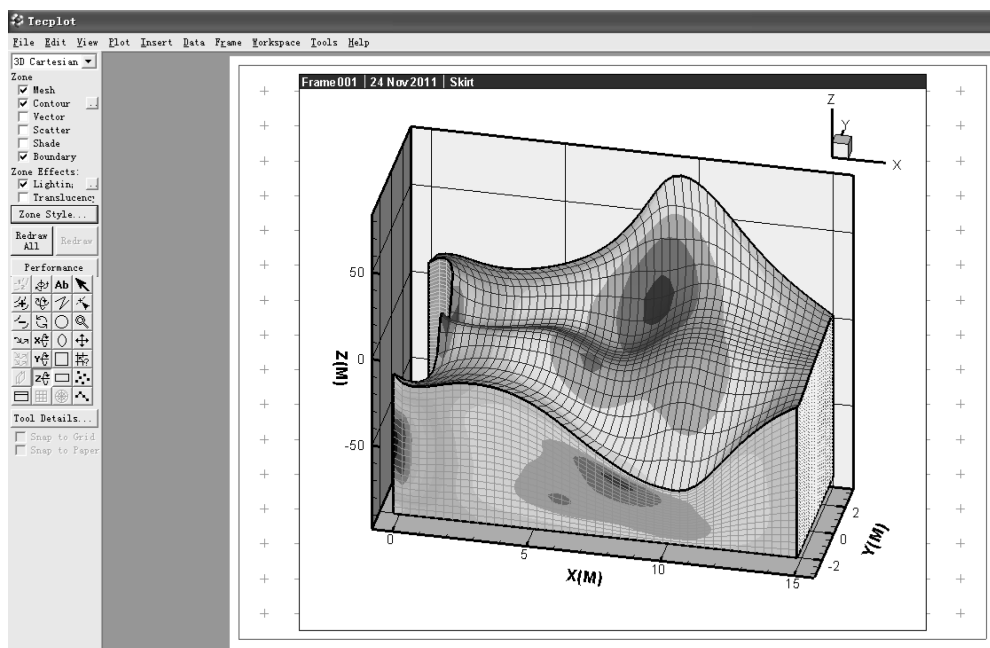


图 7-99　最终的显示结果

2．用结构化排列的数据绘制等高线

1）单击［File］>［New Layout］。选择［File］>［Load Data File（s）］菜单命令，在TECPLOT 的安装目录 TEC100 下选择［Demo］>［2D］>［cylinder.plt］，在弹出的“Select Initial Plot”对话框中选择“2D Cartesian”，如图 7-100 所示，然后单击“OK”按钮确认操作。

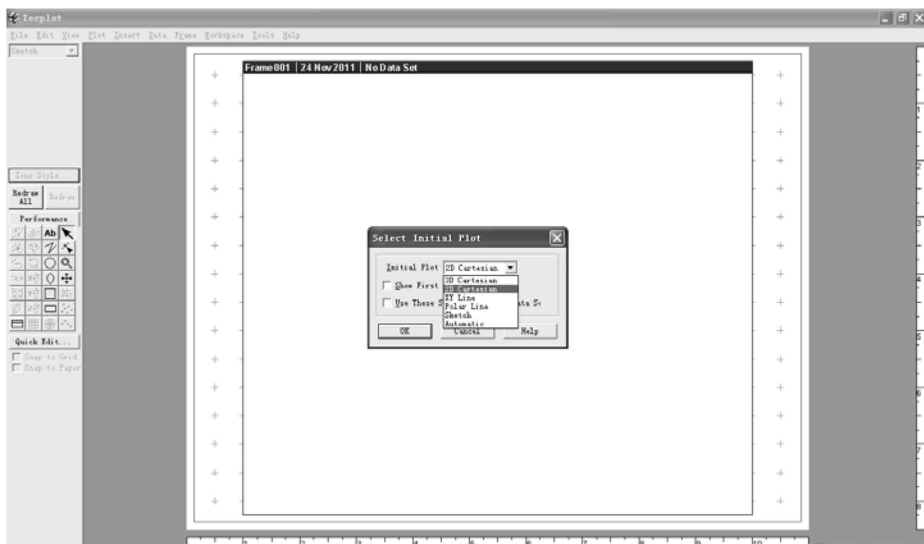


图 7-100 “Select Initial Plot”对话框

2）在“Zone”标题栏中选中“Contour”，取消勾选“Mesh”，在弹出的“Contour Detail”对话框中的“Var”项选择变量“V（M/S）”，如图 7-101 所示。单击“Close”按钮退出。

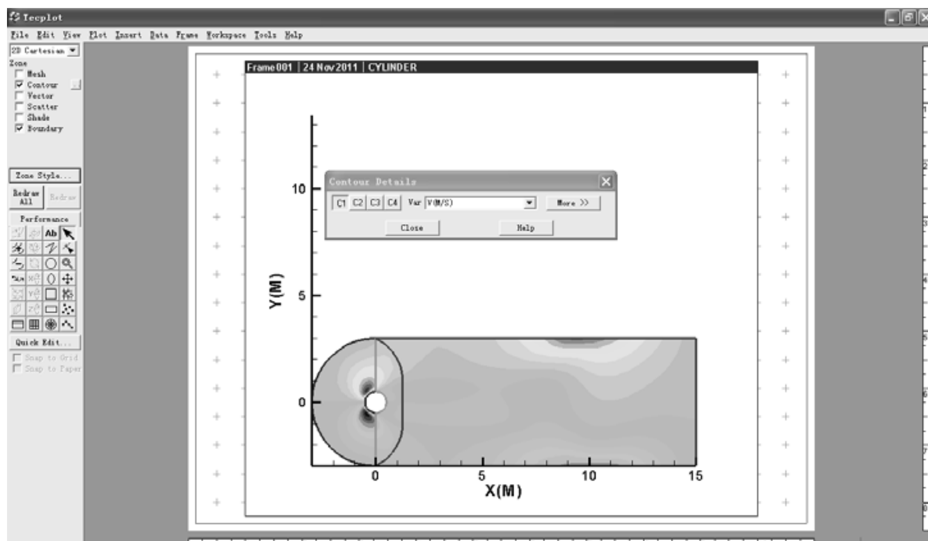


图 7-101 Contour Detail 设置

3）在左侧的工具栏中单击“Zone Style”按钮，选中“Zone1”, 将“Contour Type”设置为“Lines”，选中“Zone2”, 将其设置为“Flood”，选中“Zone3”，将其设置为“Both Lines and Flood”，如图 7−102 所示。

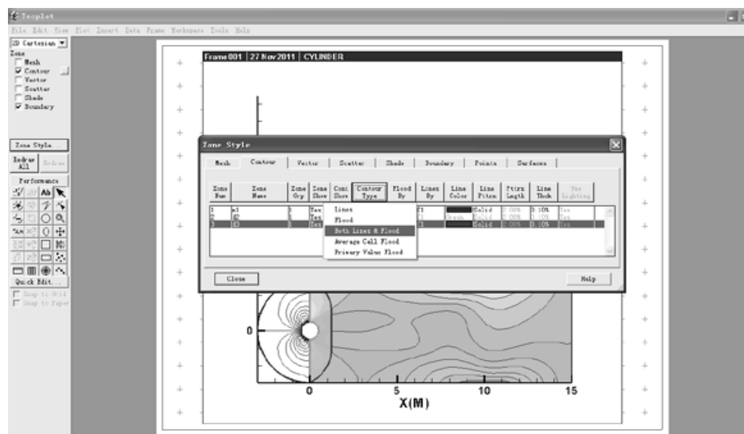


图 7−102　Zone Style 设置

4）在“Plot”菜单中选择“Contour”，在弹出的对话框中单击“More”，选择“Levels”选项卡，单击“New Levels”按钮，选择“Min，Max and Delta”项，然后设置参数“Minimum Level”的值为“−75”；设置参数 “Maximum Level”的值为“75”；设置参数“Delta”的值为“15”，如图 7−103 所示。单击“OK”按钮，关闭对话框。

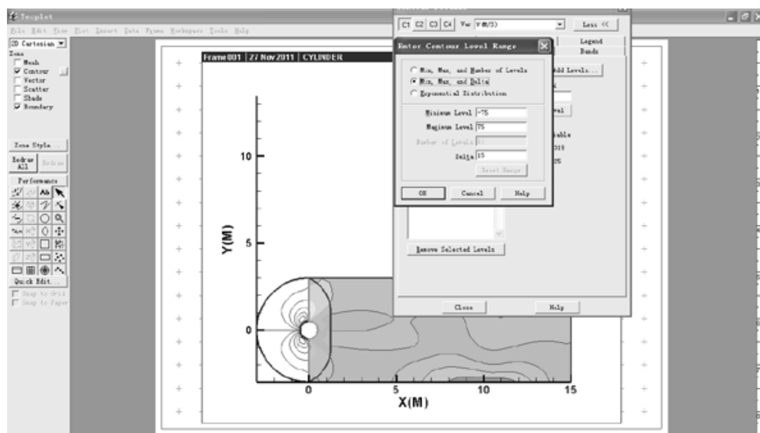


图 7−103　New Levels 设置

5）在左侧的工具栏按钮栏中，单击“调整”按钮（右起第一列自上第二个按钮），单击“Y”轴，移动光标至 *Y* 轴顶端（光标将会变为竖直向下的箭头），此时按鼠标左键拖动 *Y* 轴到 *y*=10 的位置。再在工具按钮中单击“选择”按钮。然后单击坐标轴，选中整个图像。当光标显现为十字箭头时，按住鼠标左键将图像拖动到整个工作区的中央。

6）在“Plot”菜单中选择“Contour”，在弹出的对话框中单击“More”，选择“Legend”选项卡，勾选“Show Contour Lengend”。

7）单击图例，按住鼠标左键将其拖到合适的空白位置。

8）在左侧的工具栏按钮栏中单击“标记”按钮后，再单击图像中的等高线，将出现需要的数值。等高线显示如图 7-104 所示。

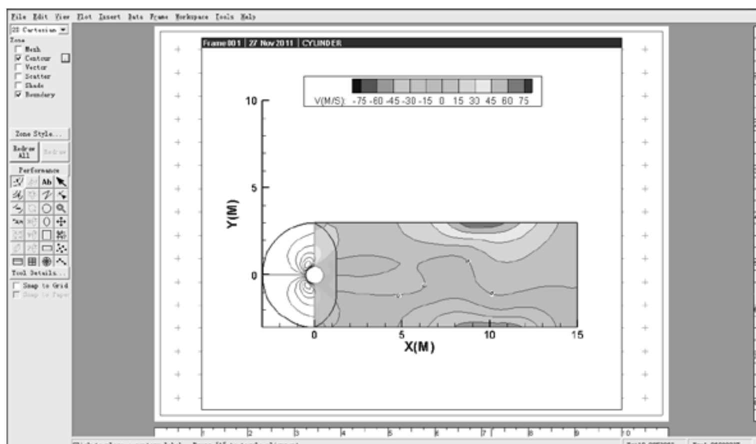


图 7-104 等高线显示

3．创建有影等高线

1）单击［File］>［New Layout］，选择［File］>［Load File（s）］菜单命令，在 TECPLOT 的安装目录下的 TEC100 中选择［Demo］>［3D］>［skirt.plt］。

2）在弹出的“Initial Plot”对话框中选择“3D Cartesian”，然后单击“OK”按钮，确认操作。

3）在左侧的工具栏中选择“定 Z 轴旋转”按钮（左起第二列倒数第二个按钮），用鼠标单击图像将其拖动旋转 180°，直至面向读者。

4）在左侧工具左上方“Zone”标题栏中选中“Contour”，取消勾选“Mesh”，在弹出的“Contour Detail”对话框中的“Var”项选择变量“P（N）”，如图 7-105 所示。单击“Close”按钮退出对话框。

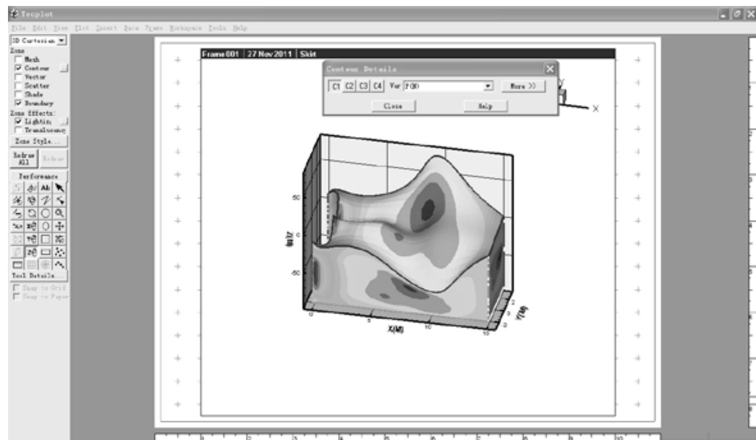


图 7-105 Contour Detail 设置

5）在左侧的工具栏中单击“Zone Style”按钮，在弹出的对话框中选择“Contour”选项卡，选择所有区域，将“Contour Type”设置为“Flood”方式，如图 7-106 所示。

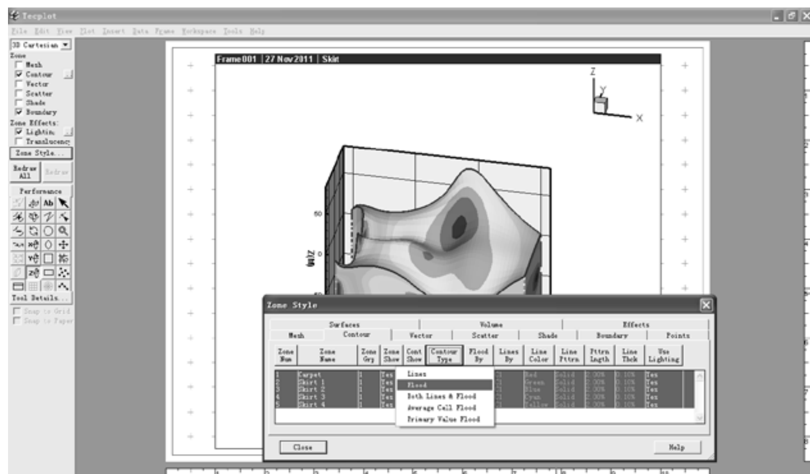


图 7-106　Zone Style 设置

6）选择“Effects”选项卡，将“Surface Translucency”设置为 40%，再将“Use Surface Translucency”设置为“Yes”。选择“Boundary”选项卡，将“Bndy Color”设置为黑色，结果如图 7-107 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

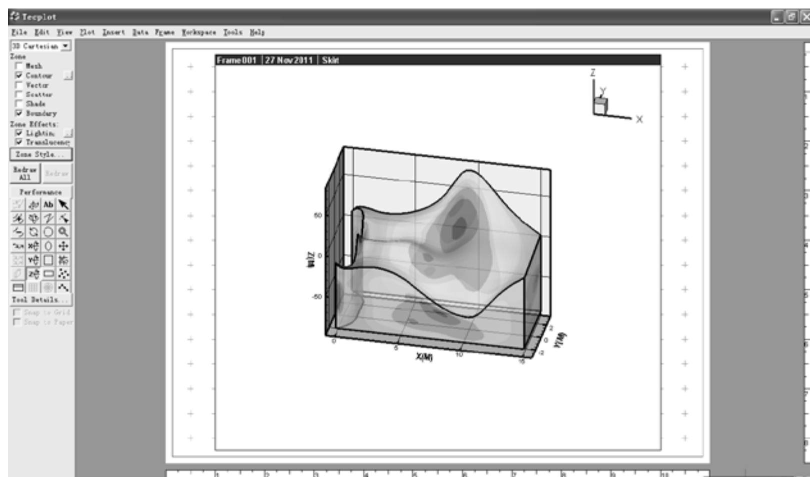


图 7-107　有影等高线显示

4．创建切片图

1）单击［File］>［New Layout］，顺序选择［File］>［Load Data File］菜单命令，在 TECPLOT 的安装目录下的 TEC100 下选择［Demo］>［3D_Volme］>［fluid.plt］。

2）在左侧的工具栏中取消勾选“Mesh”，勾选“Contour”，选中“Contour”方式。

3）在工具栏中单击“切片”按钮，然后单击图片创建第一个切片，在弹出的对话框中的“Var”项选择“E”作为“等高值变量（Contour Variable）”。此切片的默认值设置以 *X*

轴为准，如图 7−108 所示。

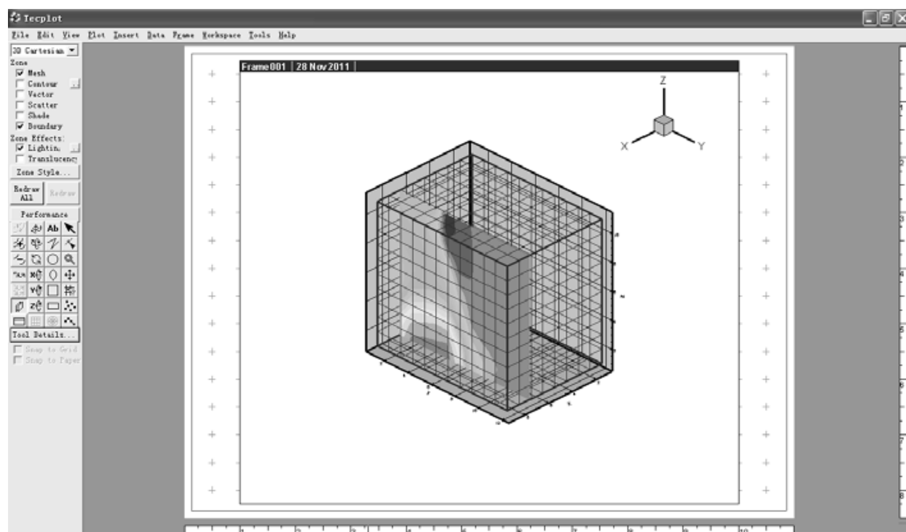


图 7−108 切片显示

4）单击左侧工具栏中的切片按钮，然后单击左侧工具栏中的“Tool Details”按钮，选择“Position”选项卡，在“Draw Slices”项中分别选择“X-Planes”、“Y-Planes”或“Z-Planes”等项，可分别显示 *X* 轴法向面、*Y* 轴法向面或 *Z* 轴法向面的切片图，如图 7−109 所示。

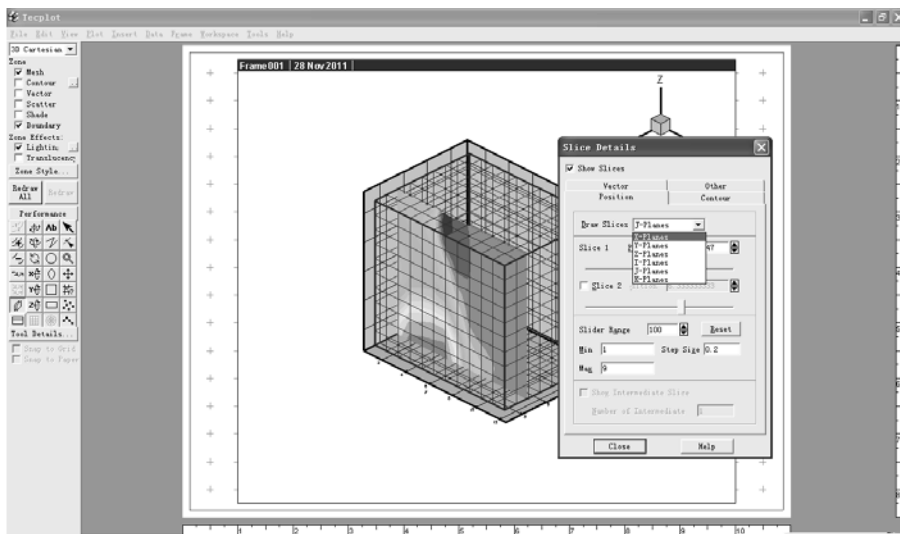


图 7−109 切片位置显示

5）选中“Slice 2”，创建第 2 个切片，可以通过按钮调整切片的位置。选中“Show Intermediate Slice”，在“Number of Intermediate”数据框中输入“3”，将会在已有的两个切片之间创建第 3 个切片，如图 7−110 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

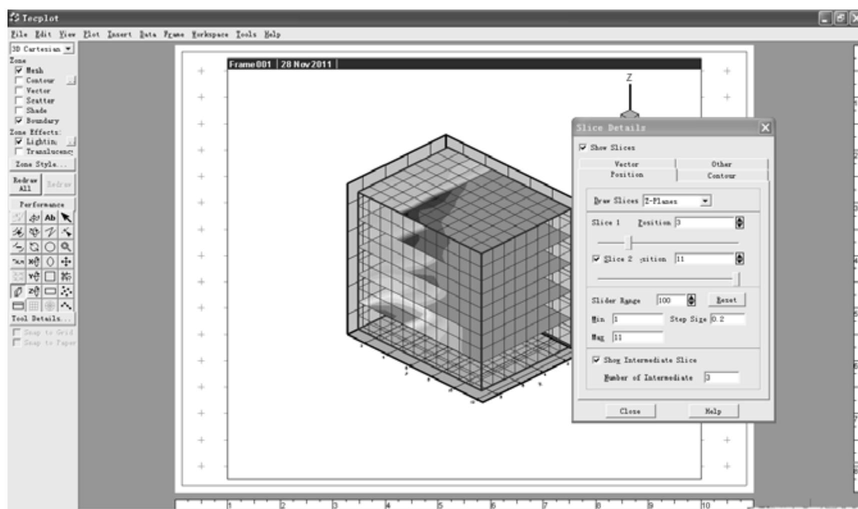


图 7-110　多组切片显示

6）选择“Other”选项卡，勾选“Show Boundary”，开启其功能，如图 7-111 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

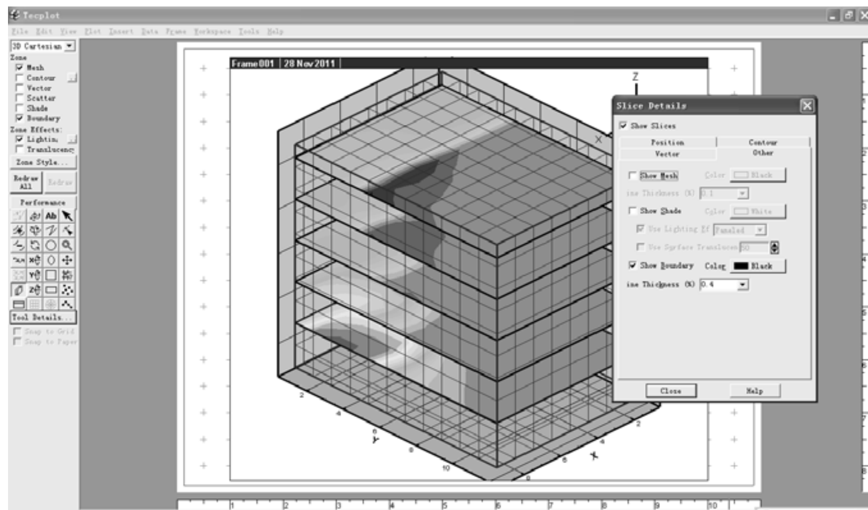


图 7-111　显示切片边框

5．创建流线图

1）单击［File］>［New Layout］，选择［File］>［Load Data File］菜单命令，在 TECPLOT 的安装目录下的 TEC100 下选择［Demo］>［3D_Volme］>［ductflow.plt］。

2）在左侧的工具栏中取消勾选“Mesh”，勾选“Contour”，在弹出的“Contour Details”对话框中的“Var”项选择“P（N）”。单击“Close”按钮，关闭对话框。

3）在工具栏中选择“Zone Style”，在弹出的“Zone Style”对话框中选择“Effects”选项卡，单击“Use Surface Translucency”按钮，选择“Yes”，如图 7-112 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。



图 7-112 Zone Style 设置

4）在左侧的工具栏中单击“切片”按钮，单击图片创建第一个切片，在弹出的对话框中的“Var”项选择“E”项作为等高值变量（Contour Variable）。此切片的默认值设置以 *X* 轴为准。

5）单击“Tool Details”按钮，在弹出的对话框中勾选“Shoe Slice”，选择“Position”选项卡，在“Draw Slices”项里选择“X-Planes”；选择“Vector”选项卡，勾选“Show Vector”，在弹出的“Select Variable”对话框中将“U”设置为“U：U（M/S），V：V（M/S），W：W（M/S）”，如图 7-113 所示。单击“OK”按钮，关闭对话框。

图 7-113 切片显示

6）在“Plot”菜单中选择“Stream Trace”项，在弹出的对话框中选择“Position”选项卡，将“Create Streamtraces With”项设置为“Volume Rod”格式，将“Rection”项设置为“Both”方式，如图 7-114 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

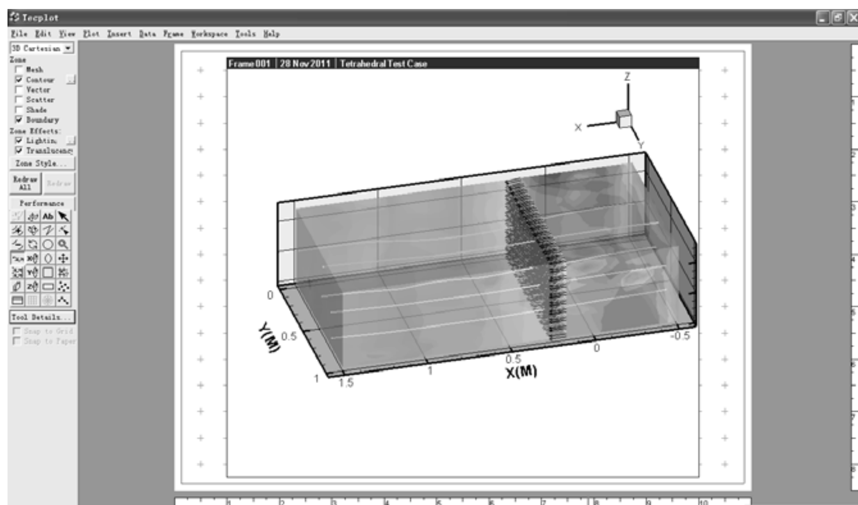


图 7−114　流线显示

7）在左侧的工具栏中单击“流线”按钮，然后用“Alt+鼠标左键单击”在切片的任何位置单击将画出流线。如果想删除所画的流线，在“Alt+鼠标左键单击”流线的同时按下〈Delete〉键即可删除。

8）在“Plot”菜单中选择“Stream Trace”项，在弹出的对话框中选择“Rod/Ribbon”选项卡，设置宽度“Width”为“0.03”，“Rod Point”为 10，勾选“Show Mesh”；将“Color”设置为“绿色”，如图 7−115 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

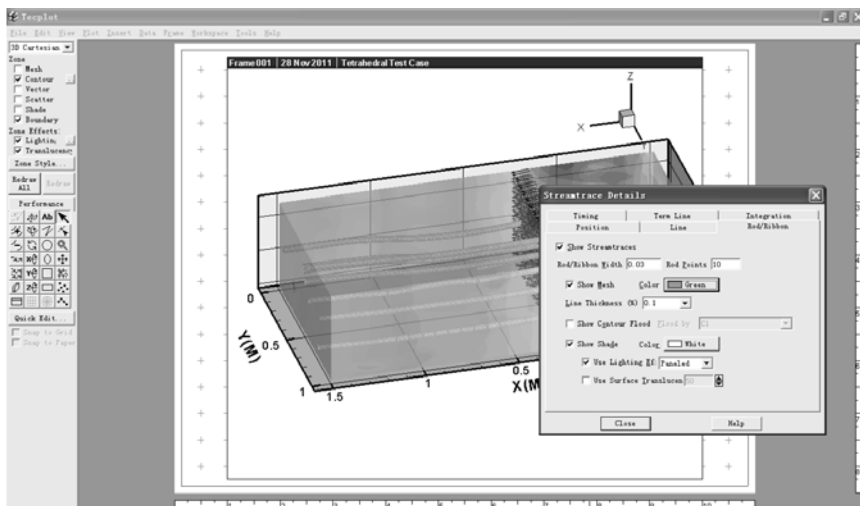


图 7−115　流线颜色设置

6．创建矢量图

1）单击［File］>［New Layout］，选择［File］>［Load Datafile］菜单命令，在 TECPLOT 的安装目录的 TEC100 下选择［Demo］>［2D］>［velocity.plt］，在弹出的“Initial Plot”对话框中选择“2D Cartesian”，单击“OK”按钮，关闭对话框。

2）在左侧的工具栏中取消勾选“Mesh”，勾选“Vector”。在弹出的“Select Variables”对话框中设置“U”为“U/RFC”，“V”为“V/RFC”，如图 7-116 所示。单击“OK”按钮，确定设置。

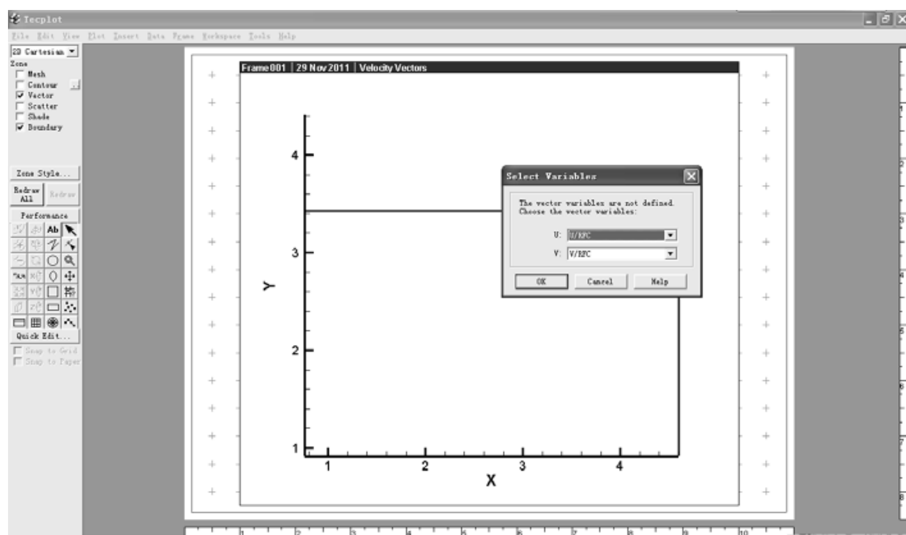


图 7-116　Select Variables 设置

3）在左侧的工具栏中单击“Zone Style”按钮，在弹出的对话框中选择“Vector”选项卡，将“Line Thck”设置为“0.4%”，“Line Color”设置为“Multi Color”；在“Plot”菜单中选择“Contour”，将“Var”项设置为“Vorticity”方式，如图 7-117 所示。

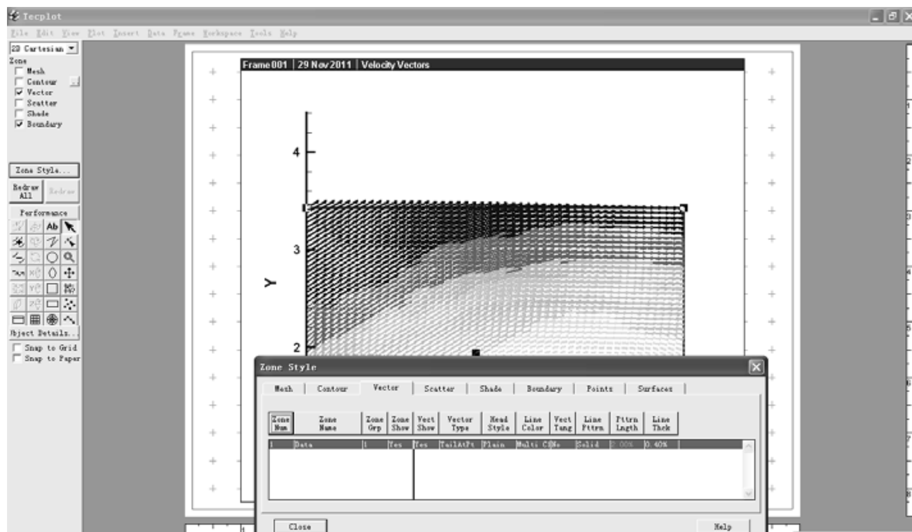
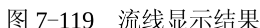


图 7-117　Zone Style 设置

4）在“Plot”菜单中选择“Vector”项，单击“Vector Length”，并且将“Relative（Grid Units/Magnitude）”项值设置为“0.2”，如图 7-118 所示。单击“Close”按钮，退出对话框。


图 7-118　Vector Length 设置

5）在左侧的工具栏中单击“流线”按钮，在图像中单击矢量画出流线。通过在图像中拖动鼠标添加流线倾斜耙面，如图 7-119 所示。


图 7-119　流线显示结果

7．创建动画

1）单击［File］>［New Layout］，选择［File］>［Load Datafile］菜单命令，在 TECPLOT 的安装目录 TEC100 下选择［Demo］>［2D］>［multizn.plt］，在“Initial Plot”对话框中选择［Initial Plot］>［2D Cartesian］，单击“OK”按钮确认操作。

2）在左侧的工具栏中取消勾选“Mesh”，勾选“Contour”。在弹出的“Contour Detail”对话框中设置“Var”为“U（M/S）”。单击“OK”按钮，确认操作。

3）在左侧的工具栏中顺序单击“Zone Style”按钮，选择“Contour”选项卡，将“Contour Type”项设置为“Both Lines and Flood”，将“Line Color”设置为红色，如图 7-120 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

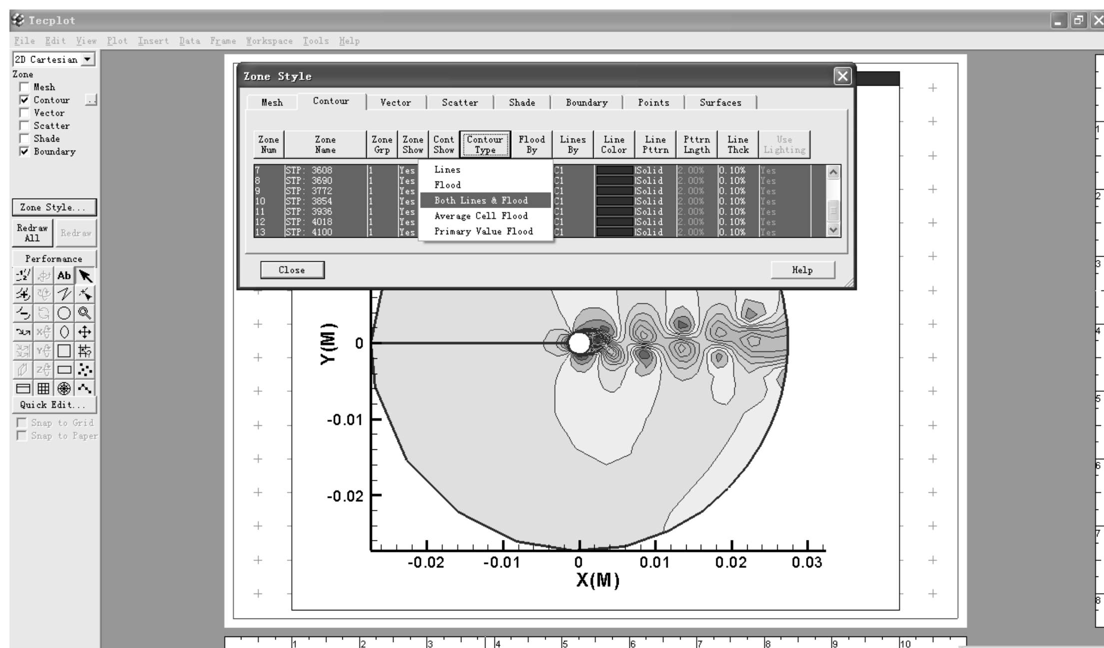


图 7-120　Contour 设置

4）选择“Boundary”选项卡，将“Bndy Color”设置为“黑色”，将“I-Indx Bndy”设置为“None”，如图 7-121 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

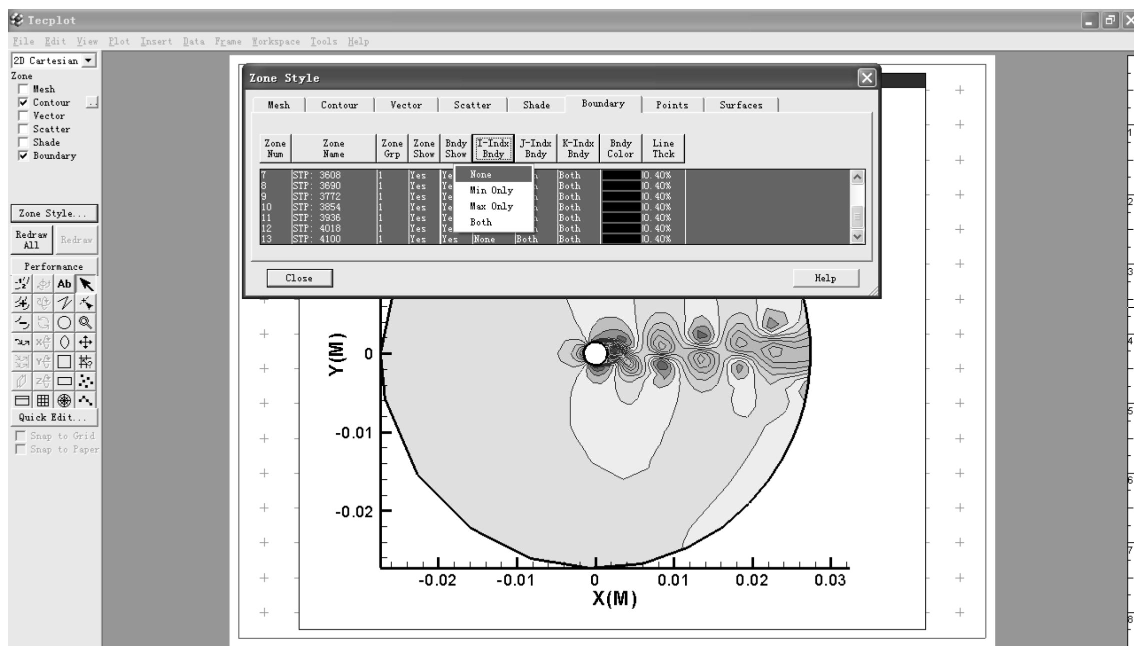


图 7-121　Boundary 设置

5）选择“Tools”菜单中的“Animate”项，单击“Zones”，如图 7-122 所示。

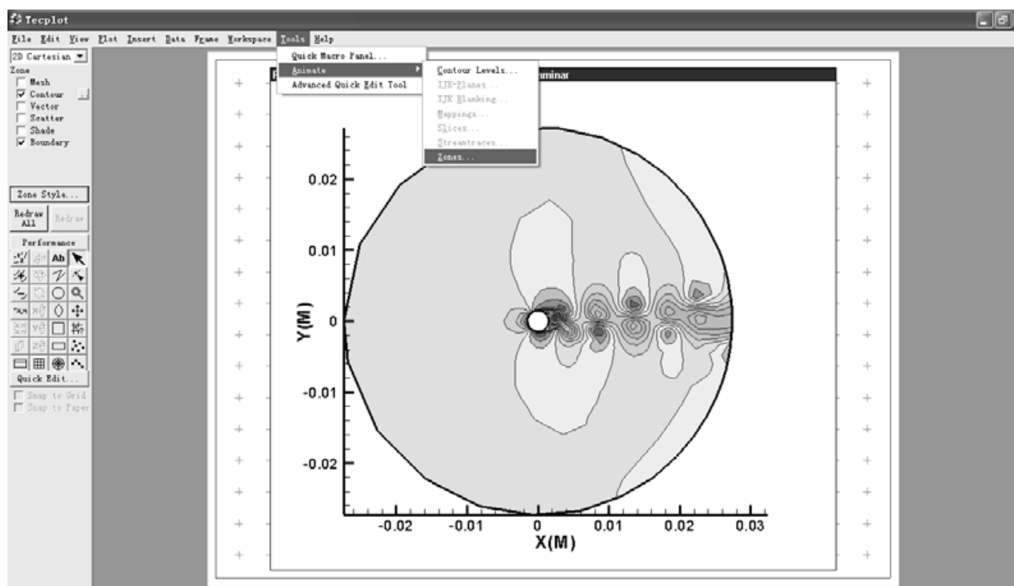


图 7-122　Animate 设置

6）在弹出的“Animate Zones”对话框中将“Animate”设置为“To AVI File”；然后单击“Animate”按钮，将“Animate Speed”设置为“10”。保存动画文件，如图 7-123 所示。单击“OK”按钮，关闭对话框。

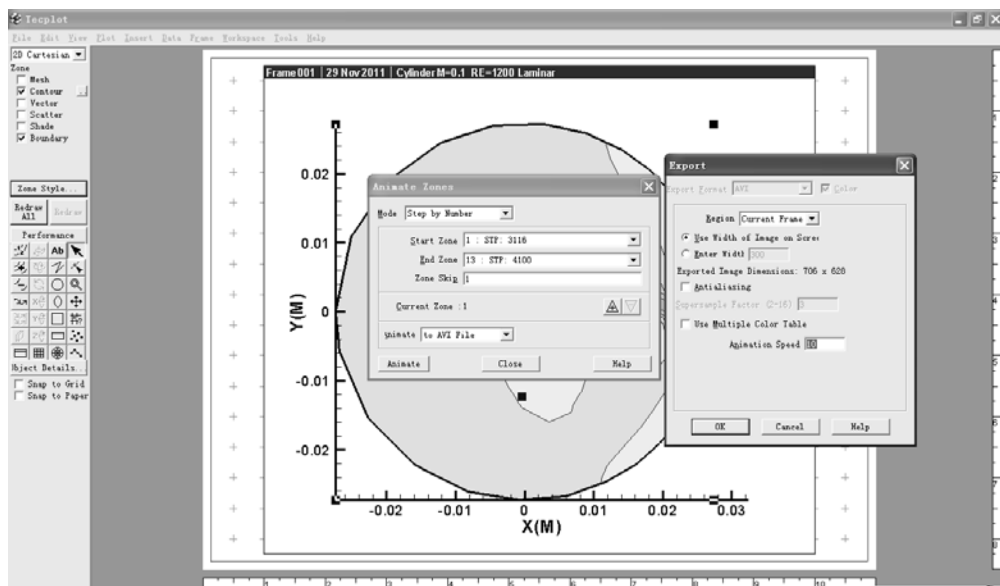


图 7-123　保存动画文件

8．创建等面图

1）单击［File］>［New Layout］，选择［File］>［Load Data File］菜单命令，在 TECPLOT 的安装目录 TEC100 下选择［Demo］>［3D_Volume］>［isosurfaces.plt］>

［Select Plot］>［3D Cartesian］，单击“OK”按钮确认操作。

2）在左侧的工具栏中取消勾选“Mesh”，然后再单击“Zone Style”按钮，选择2、3、4区，将“Zone Show”设置为“Deactivate”，如图7−124所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

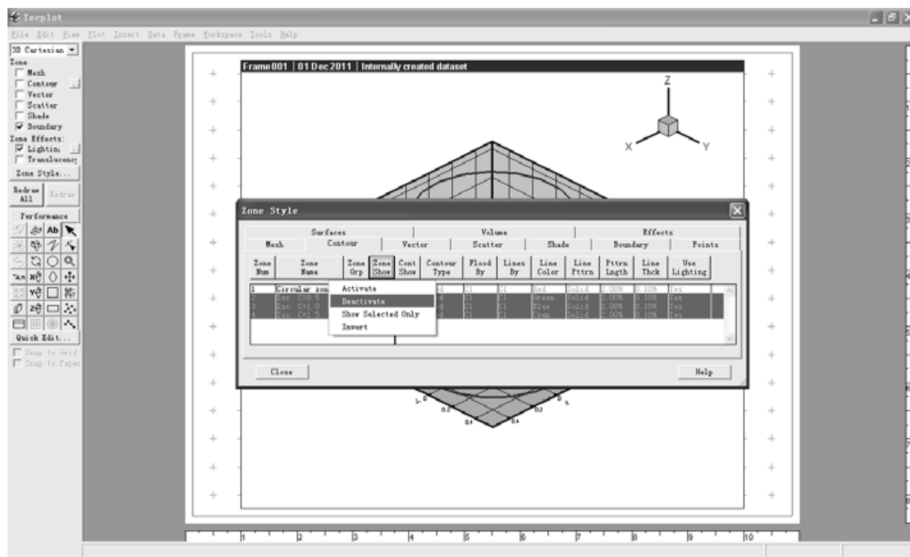


图7−124　Zone Style 设置

3）选择“Plot”菜单下的“Iso-Surface...”项，在弹出的“Var”对话框中选择“C”作为等高图变量（Contour Variable），选中“Show Iso-Surface”，设置“Value1”为“0.4”、“Value2”为“0.8”、“ Value3”为“1.4”，如图 7−125 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

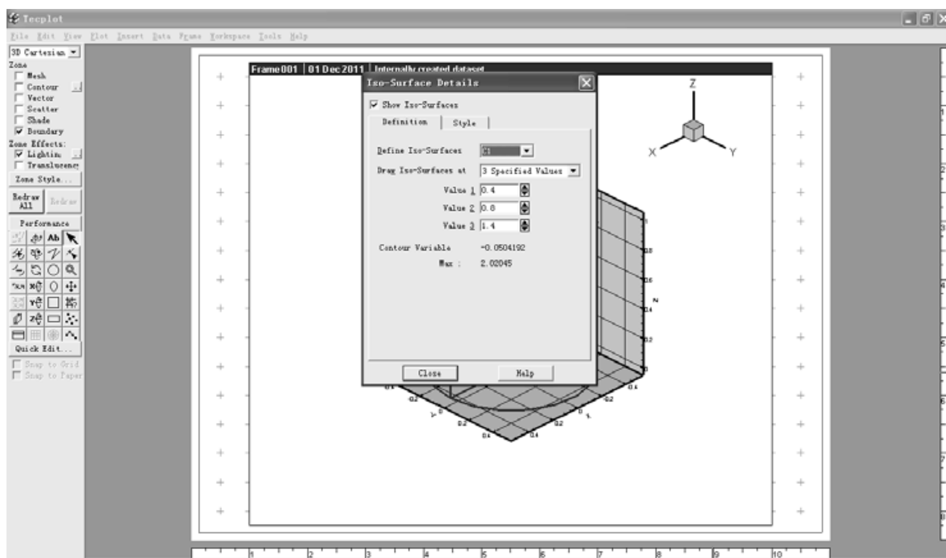


图7−125　等高变量设置

4）选择“Style”选项卡，选中“Use Lighting Effect”，将“Paneled”改为“Gouraud”。勾选“Use Surface Translucency”，将变量值设置为 50，如图 7−126 所示。单击“Close”按钮，关闭对话框。

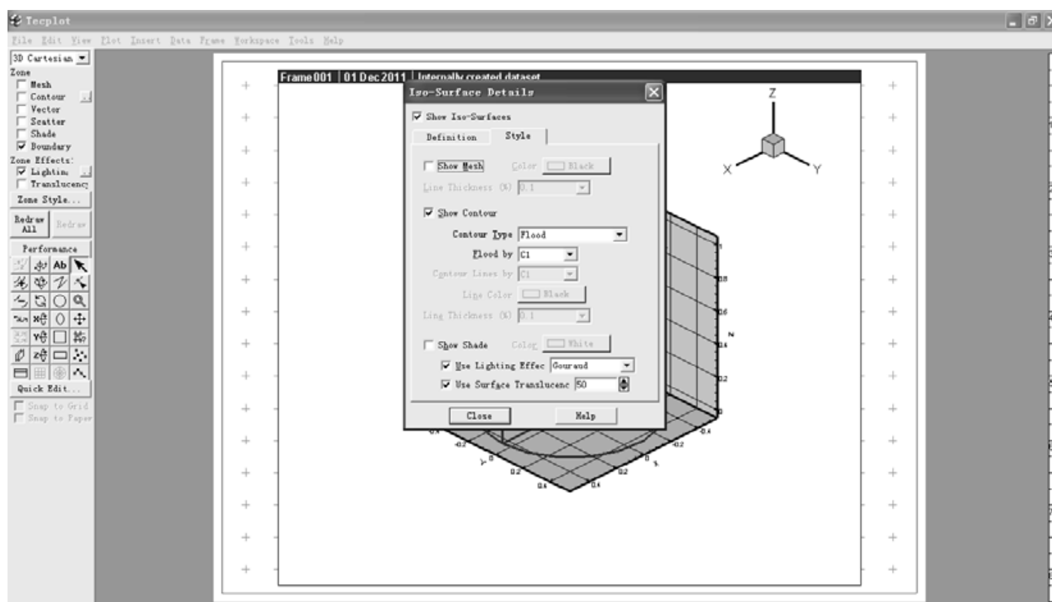


图 7−126　设置 Iso-Surface

5）在左侧的工具栏中单击“定 Z 轴旋转”按钮，在图像上按住鼠标左键拖动旋转至面向用户。设置结果如图 7−127 所示。

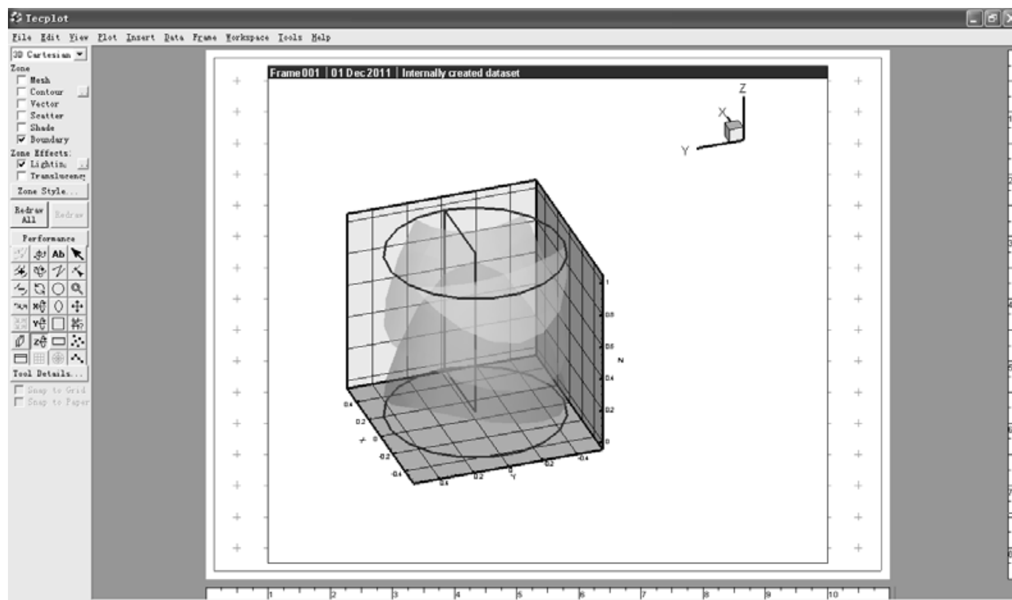


图 7−127　设置结果

7.2.4 导入 FLUENT 计算结果

1．FLUENT 文件数据加载器

FLUENT 数据加载器如图 7-128 所示，其中有如下 4 个选项：

1）Load Case and Data Files（加载网格数据和计算结果）：读入算例文件和数据文件。网格信息存放在算例文件中，流场变量的计算结果保存在数据文件中。TECPLOT 将读入所有的变量并将其加入 TECPLOT 数据集合。如果某个变量仅出现在某个区域上，则在其他区域上，TECPLOT 会自动将该变量设置为 0。

2）Load Case File Only（只加载网格）：只读入算例文件，并设置对应的网格选项。

3）Load Residuals Only（只加载残差）：只从数据文件中加载残差数据。

4）Load Multiple Case and Data Files（加载多组网格数据和计算结果）：读入多组网格数据以及对计算结果进行处理。

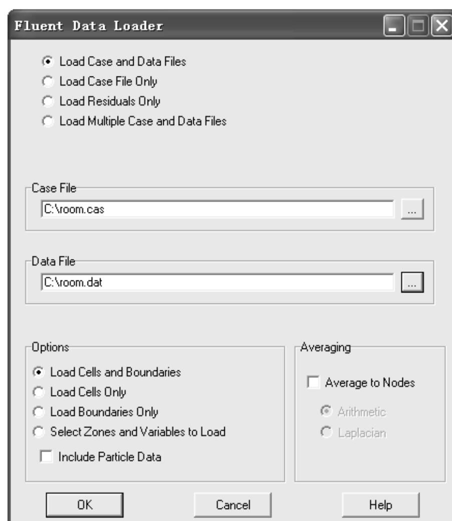


图 7-128 FLUENT 数据加载器

上述 4 项的下方是与这 4 项相对应的网格选项（Option）组合框，其中包括如下选项：

1）Load Cells and Boundaries（加载单元和边界）：从算例文件中读入单元数据和边界区域。每个流体、固体或边界区域在 TECPLOT 软件中将显示为独立的区域。

2）Load Cells Only（只加载单元数据区域）：每个区域在 TECPLOT 中都显示为独立的数据区域。

3）Load Boundaries Only（只加载边界）：只加载边界区域。每个区域在 TECPLOT 中都显示为独立的数据区域。

4）Select Zones and Variables to Load（选择加载的区域和需要加载的项目）：在组合框下方是 Data File（数据文件）输入框。可以直接在输入框中输入需要加载的数据文件名，或单击 Select（选择）按钮直接从硬盘上选择数据文件。

2．加载 FLUENT 计算结果步骤及后处理

1）如图 7-129 所示，选择［File］>［Import...］菜单命令，导入 FLUENT 软件的计算结果。

2）在弹出的“Select Import Format”对话框中选择“Fluent Data Loader”选项，如图 7-130 所示。单击“OK”按钮，确认操作。

3）在弹出的“Fluent Data Loader”对话框中选中“Load Case and Data Files”，如图 7-131 所示。

4）选择相应的“Data”和“Cas”文件，注意要同名（扩展名分别为 dat 和 cas）。单击“OK”按钮，确认操作。

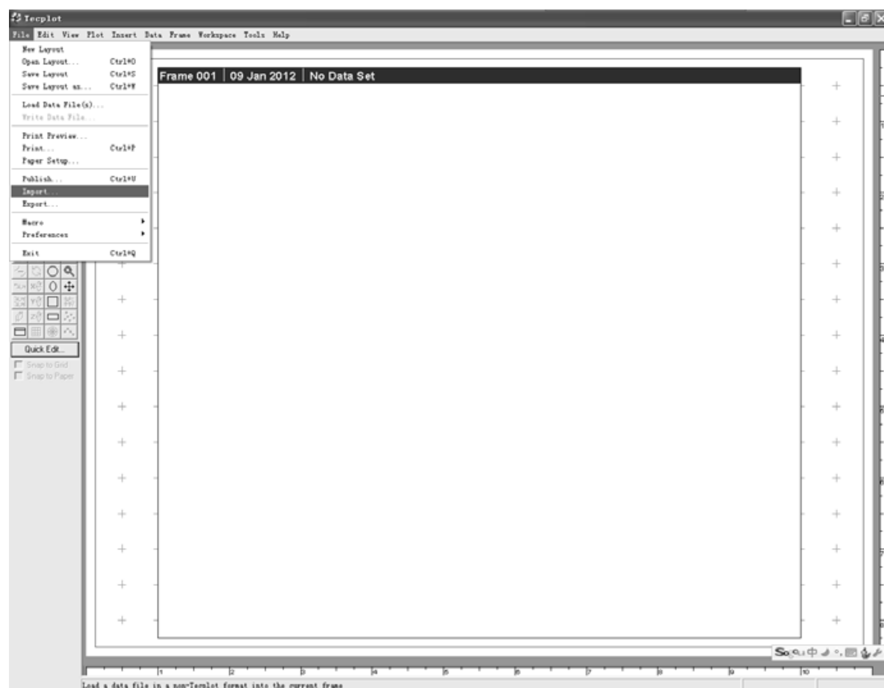


图 7-129　菜单 File/Import

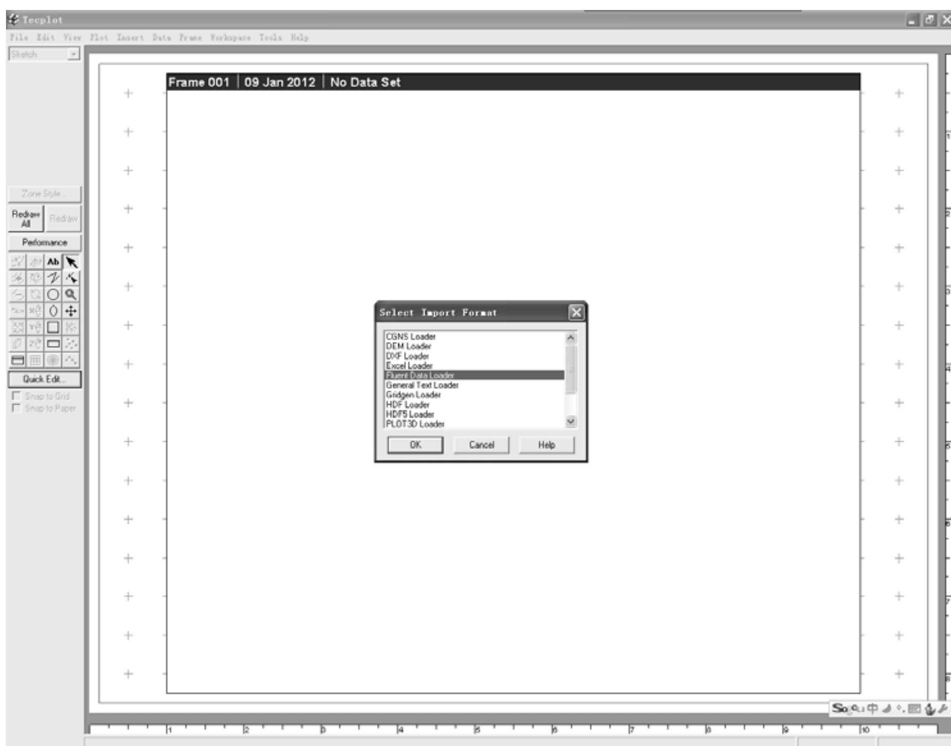


图 7-130　Fluent Data Loader 选项

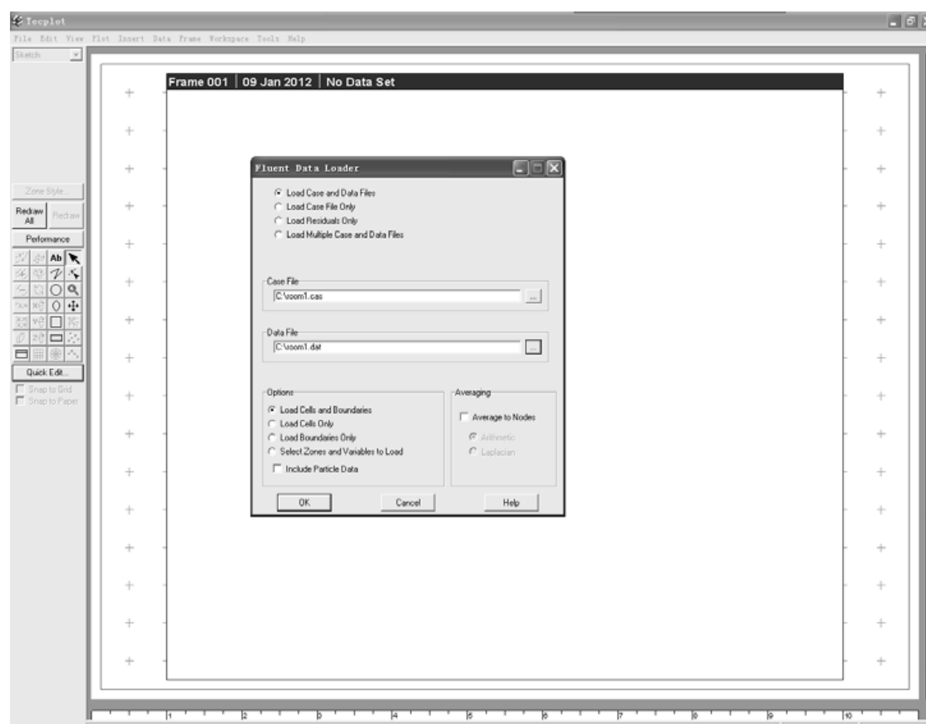


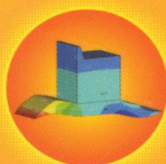
图 7-131　选中“Load Case and Data Files”选项

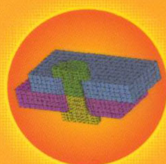
ISBN 978-7-111-39084-8
策　　划：张淑谦
封面设计：子时文化 ZiShi Culture

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS 13.0流场分析技术及应用实例



SolidWorks系列
AutoCAD系列
Pro/E系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

ANSYS系列已出版

- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析

上架建议：计算机/辅助设计

地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服中心：(010)88361066
销售一部：(010)68326294
销售二部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203

邮政编码：100037
网络服务
门户网：http:www.cmpbook.com
教材网：http:www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

ISBN 978-7-111-39084-8



定价：58.00元（含1DVD）